

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

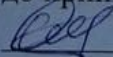
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА ЧМЗ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ
НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.8.03.24.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-323
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»

(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 ТЮМЕНЦЕВ Олександр

Керівник: к.т.н., доцент
Артем МАСЛІЙ

Рецензент: к.т.н., доцент
Олександр ОБОЗНИЙ

Харків – 2024

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

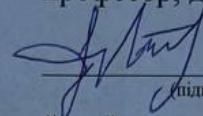
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

 Михайло БАБАШ
(підпис)
« » 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**
Тюменцева Олександра Сергійовича

1 Тема «Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом застосування накопичувачів енергії»,
керівник Маслій Артем Сергійович, к.т.н., доцент,
затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від 30 вересня 2024 року № 8.

2 Строк подання студентом закінченої роботи 06 січня 2025 року.

3 Вихідні дані: маневровий тепловоз ЧМЕЗ, чотиритактний шестициліндровий дизельний двигун K6S310DR, тяговий двигун TE-006, тяговий генератор DT-802.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки

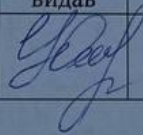
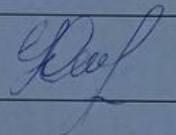
- 1) Загальна характеристика тепловоза ЧМЕЗ та його модернізацій
- 2) Математичне моделювання роботи тепловозу ЧМЕЗ
- 3) Розробка та моделювання гібридної системи з двигунами постійного струму
- 4) Математичне моделювання гібридного тепловоза з асинхронним приводом
- 5) Визначення економічного ефекту від застосування гібридної силової установки на тепловозі ЧМЕЗ

5 Перелік графічного матеріалу

- 1) Загальний вид тепловозу ЧМЕЗ – один слайд (формат А4).
- 2) Математичний опис основних вузлів тепловозу ЧМЕЗ – два слайди (формат А4).
- 3) Результати імітаційного моделювання роботи маневрового тепловоза – один слайд (формат А4).
- 4) Режими роботи маневрових тепловозів – один слайд (формат А4).

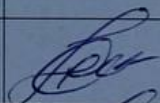
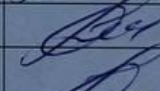
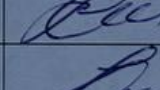
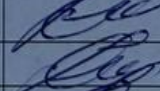
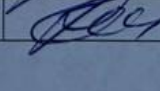
- 5) Функціональна схема гібридного маневрового тепловозу – два слайди (формат А4).
- 6) Моделювання накопичувачів енергії – один слайд (формат А4).
- 7) Результати моделювання роботи гібридного тепловоза з ДПС – один слайд (формат А4).
- 8) Результати моделювання роботи гібридного тепловоза з АП – один слайд (формат А4).
- 9) Витрати пального на роботу локомотива за роками – один слайд (формат А4).
- 10) Висновки до роботи (1 слайд).

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання: 02 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	02.10-07.10.24	
2 Збирання та обробка статистичної інформації.	08.10-18.10.24	
3 Виконання роботи по розділам кваліфікаційної роботи.	19.10-19.12.24	
4 Перевірка виконаних завдань у керівника кваліфікаційної роботи, виправлення помилок.	20.12-24.12.24	
5 Робота над оформленням графічної частини.	25.12-31.12.24	
6 Нормоконтроль. Підготовка до захисту.	01.01-05.01.25	

Студент  ТЮМЕНЦЕВ Олександр
(підпис)

Керівник  Артем МАСЛІЙ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 96 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 49 рисунків, 16 таблиць, 12 літературних джерел.

Ключові слова: тепловоз, дизельний двигун, асинхронний електродвигун, частотний перетворювач, система керування.

Об'єктом дослідження є модернізована тягова електрична передача маневрового тепловоза ЧМЕЗ.

Метою дослідження є дослідження ефективності роботи гібридної системи з різними типами приводів.

У кваліфікаційній роботі розглянуто можливість модернізації маневрового тепловоза ЧМЕЗ із впровадженням гібридної системи, що включає дизельний двигун невеликої потужності, тяговий синхронний генератор, накопичувачі енергії та тягові асинхронні двигуни. Досліджено ефективність роботи базового та модернізованого варіантів на ділянці шляху.

ABSTRACT

This qualification paper includes 96 sheets of A4 explanatory note, including 49 pictures, 16 tables, 12 literary sources.

Keywords: ocomotive, diesel engine, asynchronous electric motor, frequency converter, control system

The object of research is a modernized traction electric transmission of a shunting diesel locomotive ЧМЕЗ.

The aim of research is studying the performance of a hybrid system with different types of drives.

In the qualification work the possibility of modernization of Chrome 3 shunting locomotive with the introduction of a hybrid system including a diesel engine of low power, a traction synchronous generator, energy storage devices and traction asynchronous motors is considered. The efficiency of work of basic and upgraded variants on the section of the road is investigated.

Зміст

Вступ	8
1 Загальна характеристика тепловоза ЧМЕЗ та його модернізацій	11
2 Математичне моделювання роботи тепловозу ЧМЕЗ	17
2.1 Математичне моделювання двигуна постійного струму ТЕ-006	17
2.2 Математичне моделювання генератора постійного струму TD-802	28
2.3 Математичне моделювання збуджувача тягового генератора	37
2.4 Математичне моделювання дизеля	39
2.5 Математичне моделювання руху поїзда	55
3 Розробка та моделювання гібридної системи	56
3.1 Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза	56
3.2 Математичне моделювання системи Г-Д	57
3.3 Імітаційне моделювання накопичувачів енергії	60
4 Розробка та моделювання гібридної системи з асинхронним приводом	69
5 Визначення економічного ефекту від застосування гібридної силової установки на тепловозі ЧМЕЗ	79
5.1 Коротка характеристика запропонованого рішення	79
5.2 Методика розрахунку економічного ефекту	80
5.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження гібридної силової установки з асинхронними двигунами	81
Висновки	94
Список використаних джерел	95
Додаток	96

					КРМ.273.8.03.24.01 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом застосування накопичувачів енергії	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Тюменцев						
Перевір.		Маслій					6	96
Рецензент		Обозний				УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ		
Н. Контр.		Маслій						
Затверд.		Бабаєв						

Вступ

Вперше ж у світі залізниці з'явилися на початку XIX століття у зв'язку з розвитком великої промисловості. 27 вересня 1825 року в Англії був відкритий рух на першій залізниці загального користування на лінії Стоктон - Дарлінгтон довжиною 56 км. У 1832 році у Франції з'явилася перша залізниця між Ліоном і Сент-Ет'єном довжиною 58 км.

Необхідність будівництва залізниць на Україні виникла вже давно. Географічне положення краю, його природні багатства були цьому передумовою. Україні потрібні були залізниці для вивозу продукції сільського господарства головним чином з родючого Південно-Західного краю і продукції промисловості — з районів Донбасу і Кривого Рога. Після поразки в Кримській війні царський уряд усвідомив необхідність з'єднання центра країни з портами на Чорному та Азовському морях і з західними кордонами, виходячи з стратегічних міркувань. Відповідно до цього на Україні виникло три основних осередки будівництва залізниць: Південно-Західний край, в районі якого поступово виникала мережа Південно-Західних залізниць; промисловий район Донбасу і Кривого Рога, в районі яких виникали Донецька і Катерининська (Сталінська) залізниці; для зв'язку центра з морем і з промисловими районами України будувалась мережа Південних залізниць.

Після будівництва лінії Курськ - Харків - Азовська почали будувати залізниці спеціально для вивозу вугілля з Донбасу. Першою такою залізницею була магістраль Костянтинівка - Єленовка, яка стала до ладу у 1872 р. Вона й послужила початком розвитку мережі майбутніх Донецьких залізниць. У 1884 р. стала до ладу Катерининська (Сталінська) залізниця, побудована для вивозу продукції промисловості Кривого Рога. Першою була лінія Нижнєдні-провськ - Долинська. У 1904—1906 рр. була побудована так звана Друга Катерининська залізниця (яка об'єдналася потім з Першою) по напрямку Долгінцево-Волноваха. Залізниці України в результаті громадянської війни

зазнали великих збитків. Було зруйновано багато мостів, колій, станцій, засобів зв'язку.

У 1921 р. Почалася відбудова залізниць України, але їх робота порівняно з довоєнним рівнем залишилась все ж низькою. На кінець 1921 р. Перевозка вантажів ще не перевищувала 1/7 вантажообороту 1913 р. Були відбудовані всі постійні споруди, і рух було відкрито майже на всіх лініях. З 1922 р. почали впорядковувати зруйноване лінійне господарство. Почалося будівництво нових ліній на Україні. Була побудована лінія Херсон - Апостолово, добудовувались залізниці, закладані за часів царату,- Дніпропетровськ - Апостолово, Прилуки - Ново білиця, Ново білиця - Цветково, Чернігів – Овруч, загальною довжиною 700 км. У 1935 р. в країні було досягнуто рекордне для того часу вантаження 76 тис. вагонів на добу проти 58 тис. вагонів у 1934 р. У 1935 р. вперше було виконано план перевозом (на залізницях план був виконаний на 107,6 %).

У роки другої і третьої п'ятирічок транспорт республіки разом з залізницями всієї країни продовжував поповнюватися найновішими паровозами і вагонами, з'явилися тепловози і електровози. На залізницях України широко впроваджувалась автоблокіровка, автоматичне зчеплення вагонів, автоматичне гальмування поїздів. Загальна довжина мережі залізниць України збільшилась до 14,8 тис. км, а після возз'єднання з Західною Україною — до 19,7 тис. км, що становило 17,1% мережі залізниць всього Радянського Союзу. За час війни залізничний транспорт України був дуже пошкоджений. Гітлерівці підірвали і знищили всі мости, системи водопостачання, вокзали, паравозні і вагонні депо. Зовсім зруйновані були паравозо- і вагоно- ремонтні заводи. Відступаючи, фашисти повністю зруйнували до 50% залізничних колій України, а решту дуже пошкодили. Великих збитків було задано рухомому складу, який був або знищений, або вивезений фашистами. Відбудова залізниць України почалася ще в ході боїв за звільнення. Великі завдання постали перед залізничниками у четвертій п'ятирічці. До кінця п'ятирічки на Україні було здано в експлуатацію 200

нових вокзалів. Серед них такі великі, як Сталіно, Микитівна, Попасна, Луганськ, Харків, Дніпропетровськ, Сімферополь, Євпаторія, Феодосія, Нікополь, Кременчук, Полтава, Чернігів, Севастополь та інші. Вантаження на залізницях країни збільшилося за роки п'ятирічки на 43,3%, а продуктивність праці – на 39%. Була побудована лінія Федорівна – Каховка, яка здійснила зв'язок з районом будівництва Каховської ГЕС і дала вихід з Донбасу на Дніпро.

У шостій п'ятирічці перед робітниками залізниць було поставлено завдання забезпечити дальше зростання перевозом. У 1958 р. план перевозки вантажів на залізницях України був виконаний на 102%. При цьому порівняно з 1957 р. перевозки вантажів зросли на 8%. У 1960 році в Україні з'явився новий різновид магістрального залізничного транспорту – метрополітен. У Києві наприкінці 1960 року була здана в експлуатацію перша черга метро надзвичайно складного інженерного комплексу. Пізніше, 23 серпня 1975 року, на території України почав діяти другий метрополітен – у місті Харкові. У 1987 році експлуатаційна довжина залізниць уже складала 22.7 тис. км. (у 1913 році – 15.6 тис. км.).

Експлуатаційна довжина залізниць СРСР -146.1 тис. км. Україна займала одне з перших місць у СРСР по щільності залізничної мережі (37.7 км. на 1000 км території). Частина УРСР у перевозі вантажів залізничним транспортом країни в 1988 році складала 25.2%, у вантажообігу 12.8%. Частина вантажообігу залізничного транспорту в загальному вантажообігу Української РСР складала 53.3%, пасажирообороту 40.8%. У середньому на 1 км експлуатаційної довжини залізниці приходилося 22.2 млн. т./км. і 3.2 млн. пасажиро-кілометрів. Сучасний залізничний транспорт на 40% електрифікований, двох і багатоколіїні ділянки складають майже третину експлуатаційної довжини.

1 Загальна характеристика тепловоза ЧМЕЗ та його модернізацій

Тепловоз ЧМЕЗ – чехословацький маневровий тепловоз з електричною передачею з осьовою формулою 3о–3о.

Станом на 2020 рік тепловози ЧМЕЗ крім своїх основних функцій, часто використовуються, як локомотиви приміських поїздів на коротких мало задіяних ділянках.

Оскільки локомотив виконаний в габариті європейської колії, багато тепловозів даної серії використовують на євро колії в прикордонних районах України, Білорусі, Росії та прибалтійських країн де перетинаються колії 1520 і 1435 мм.

Недостатня потужність і зчепна маса ЧМЕ2 під час маневрової роботи з вантажними поїздами призвели, до необхідності проектування і побудови на заводі ŠKD потужніших тепловозів. Було прийняте рішення про побудову шестивісних маневрових тепловозів з електричною передачею для залізниць СРСР. В кінці 1963 року побудували три дослідних локомотиви які отримали позначення ЧМЕЗ[1].

Надалі в конструкцію тепловоза вносили окремі зміни, наприклад, встановили обладнання яке дозволяло керувати тепловозом одноосібно. З номера 3775 змінили висоту даху кабіни – він став на одному рівні з капотами.

Тепловози ЧМЕЗ випускалися до 1987 року. Потім розпочався випуск модифікацій даної серії локомотивів, ЧМЕЗМ, ЧМЕЗТ, ЧМЕЗЭ.

Всього для СРСР побудували 7454 тепловози ЧМЕЗ (з урахуванням модифікацій) – ЧМЕЗЕ(з електронними блоками в колах управління, будувалися з 1987 до 1989 року) і ЧМЕЗТ (з електродинамічним гальмом, будувалися з 1984 до 1991 року).

В 1991 році перший екземпляр серії ЧМЕЗ – № 0001 – передали до залізничного музею Варшавського вокзалу в Санкт-Петербурзі.

Останній тепловоз ЧМЕЗТ–7454 призначений для СРСР перетнув кордон 31 грудня 1991 року.

В 1992 році Україна замовила п'ять ЧМЕЗТз номерами 7455-7459, але закупила лише два – 7455 і 7456 (1994 р.в.) – вони надійшли в експлуатацію до київського депо Дарниця Південно-Західної залізниці. 7457-ий закупило одне з підприємств Ярославля (РФ), а останні – 7458 і 7459 – надійшли в Естонське депо Таллінн.

З метою підвищення економічності тепловоза ЧМЕЗ конструкторам довелося зайнятися перепроєктуванням машини. По новому проекту в 1977 році побудували два дослідних тепловоза ЧМЕЗМ. Після випробувань вони надійшли для дослідної експлуатації в депо Любліно.

Потужність дизеля виросла до 1500 к.с., суттєвих змін зазнала електрична частина тепловоза, змінили деякі параметри конструкції (довжина рами, ширина колісної бази візків). Службова маса тепловоза збільшилась з 123 до 126 т, запас палива збільшився з 5000 до 6000 кг. Максимальна швидкість зросла на 15 км/год, з 85 до 100 км/год.

Виготовили лише два екземпляри ЧМЕЗМ, але застосоване на них електронне обладнання і нові конструкторські рішення вузлів і деталей надалі використовувалися при створенні тепловозів ЧМЕЗТ і ЧМЕ5.

З 1987 року розпочався випуск тепловозів ЧМЕЗЕ. На тепловозах ЧМЕЗЕ так як, і на ЧМЭЗТ, встановлене електронне обладнання, яке забезпечує реалізацію максимальної потужності дизеля на низькій частоті обертання валу, яке не було встановлене на тепловозах ЧМЕЗ, але відсутнє реостатне гальмо.

В 1987 р. дослідний ЧМЭЗЕ № 5932 надійшов до СРСР. В 1987 – 1989 роках здійснювалася поставка тепловозів серії ЧМЕЗЕ. В 1988 поставили дослідну партію з 25 локомотивів (№ 6220 – 6244). В 1989 р. поставили 220 шт. (№ 6665 – 6884). Зовнішній вигляд тепловозу нічим не відрізняється від ЧМЕЗ.

В 1984 році завод «Локомотивка-Соколово» побудував два дослідних тепловоза ЧМЕЗТ з реостатним (електродинамічним) гальмуванням (№ 4385 і 4596) і електронним обладнанням для реалізації максимальної потужності дизеля на низькій частоті обертання вала. Загалом конструкція практично ідентична ЧМЕЗ.

Маса тепловоза ЧМЕЗТ (123 т), номінальна потужність (1350 к.с) і максимальна швидкість аналогічна тепловозу ЧМЕЗ. Позитивні результати випробувань перших екземплярів стали основою для виготовлення в 1985 році дослідної партії з 20 тепловозів ЧМЕЗТ. Згодом розпочалося масштабне виробництво даної модифікації. Загалом на залізницях колишнього СРСР працює 1167 локомотивів серії ЧМЕЗТ[2].

Зовні ЧМЕЗТ нічим не відрізняється від стандартного ЧМЕЗ, за виключенням обладнання реостатного гальма на даху (№ 5070-5089) або невеликого квадратного виступу на задньому капоті (вихлоп гальмівного реостата), а також відсіками з перенесеної з заднього капота акумуляторної батареї по бокам паливного бака.

В 1999 році фахівцями Коломенського заводу був розроблений проект модернізації ЧМЕЗ з установкою дизель-генератора 4-36ДГ, що складається з дизеля сімейства Д49 та генератора TD-802. Генератор TD-802 від базового тепловоза ЧМЕ залишається без конструктивних змін, лише проходить капітальний ремонт. Інше устаткування та системи залишаються без змін. Першим тепловозом так модернізованим виявився ЧМЕЗ-1026 Північної залізниці. Він отримав позначення ЧМЕЗК-1026.

У 2008 році Ярославським електровозоремонтним заводом була проведена модернізація тепловоза ЧМЕЗ- 4342, в ході якої стара ДГУ була замінена на дві сучасних виробництва Ярославського моторного заводу. У зв'язку з цим був підданий модернізації капот кузова, кабіна машиніста та додані світлодіодні буферні ліхтарі. В проекті модернізації взяли участь відразу кілька великих підприємств: ВНКТІ виступив розробником всього проекту, спроектував і виготовив систему управління, ВАТ «Автодизель»

виготовило двигуни, Ярославський електровозоремонтний завод здійснив переоснащення тепловозів, виробництво дизель-генераторних установок ДГ-450 - було довірено ТОВ «Промислові Силові Машини». Для цього проекту «Промислові Силові Машини» виготовили десять модульних дизель-генераторів ДГ-450 потужністю по 450 кВт (653 к.с.) кожен на базі двигунів ЯМЗ-8502.10-08 (виробник ВАТ «Автодизель», м. Ярославль) і тягових генераторів ГС530АМУ2 (виробник «Електроважмаш», м. Харків).

Проект модернізації ЧМЕЗ двома дизель-генераторними установками отримав подальший розвиток у вигляді створення трьох дизельного тепловоза. Цим тепловозом став модернізований тепловоз ЧМЕЗ-3323, що став експонатом III міжнародного залізничного салону «ЭКСПО 1520». Основною відмінністю від модернізації тепловозу ЧМЕЗ-4342 стало встановлення додаткового дизель-генератора потужністю 25 кВт, що працює для забезпечення власних потреб при стоянці і вимкнених основних дизель-генераторних установках. Модернізація тепловозів ЧМЕЗ дизелями Caterpillar з кожним роком становиться все більш популярною в різних країнах[3].

Найбільше розповсюдження отримав варіант комплексної модернізації тепловоза із застосуванням дизельного двигуна Caterpillar 3512B, який в Україні отримав позначення ЧМЕЗП (в країнах Прибалтики - ЧМЕЗМ, в Білорусії - ТМЕ1). Модернізований шестиосний тепловоз типу ЧМЕЗП призначений для важкої маневрової служби та вивізної роботи на загальнодержавних, регіональних та інших залізничних шляхах з шириною колії 1520 мм. Розміщення осей 3о – 3о, маса на вісь складає 20 тонн. Тепловоз оснащений електричною передачею потужності змінно-постійного струму. На тепловоз встановлений двигун внутрішнього згоряння Caterpillar 3512B потужністю 1455 кВт, і тяговий генератор змінного струму Siemens 1FC2 631. Запуск двигуна внутрішнього згоряння електричний, від акумуляторних батарей.

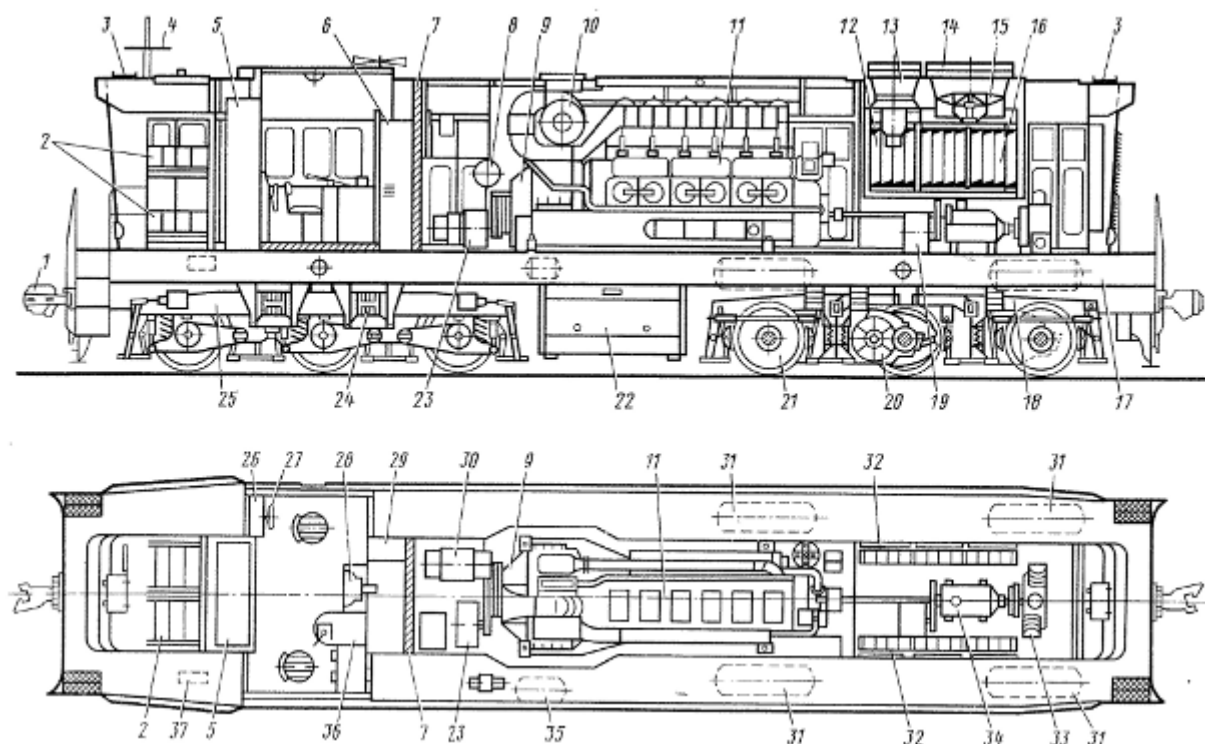


Рисунок 1.1 – Розташування обладнання тепловоза ЧМЕЗ:1 – автозчеплення;

2–акумуляторна батарея; 3 – кришка пісочного бункера; 4 – антена; 5 – апаратна камера; 6–інструментальний ящик; 7 – тепло- та звукоізоляційна стінка; 8 – резервуар керування; 9 – тяговий генератор; 10 – турбонагнітач; 11 – дизель; 12 – водяні секції радіатора допоміжного кола; 13 – вентилятор допоміжного контуру; 14 – верхні жалюзі шахти холодильника; 15 – головний вентилятор; 16 – водяні секції радіатора основного контуру; 17 – головна рама; 18 – передній візок; 19 – вентилятор охолодження тягових двигунів переднього візка; 20 – тяговий електродвигун; 21 – колісна пара; 22 – паливний бак; 23 – вентилятор охолодження тягових двигунів заднього візка; 24 – підвісний болт; 25 – задній візок; 26 – допоміжний пульт; 27 – ручне гальмо; 28 – калорифер; 29 – шафа для одягу; 30 – двомашинний агрегат; 31 – головний резервуар; 32 – бічні жалюзі шахти холодильника; 33 – компресор; 34 – гідромеханічний редуктор; 35 – запасний резервуар; 36 – пульт керування тепловозом; 37 – радіостанція

Таблица 1.1 – Технічні характеристики тепловоза ЧМЕЗ

Рід служби	маневровий
Зчіпна маса, т	123
Конструкційна швидкість, км/год	95
Сила тяги, кгс	23000
Потужність, к.с.	970
Швидкість тривалого режиму, км/год	11,4
Тягові електродвигуни	ТЕ-006
Підвішування ТЕД	опорно-осьове
Діаметр коліс, мм	1050
Дизель	K6S310DR
Номінальна потужність дизеля, к.с.	1350
Тип передачі	електрична
Генератор	TD-802
Потужність генератора, кВт	885

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики тягового двигуна ТЕ-006

Маса, кг	2450
Номінальна напруга, В	283
Максимальна частота обертання якоря, об/хв.	2420
Номінальна потужність, кВт	134
При струмі, А	750
Та частоті обертання якоря, об/хв.	295

2 Математичне моделювання роботи тепловозу ЧМЕЗ

Для проведення модернізації тягового електроприводу необхідно зробити математичну модель існуючої системи, що застосована на тепловозі ЧМЕЗ, та дослідити її властивості. Математичне моделювання тепловоза проводимо поблоково.

2.1 Математичне моделювання двигуна постійного струму ТЕ-006

На тепловозі ЧМЕЗ встановлений тяговий двигун постійного струму послідовного збудження, а тому більш детально розглянемо цей тип двигуна.

Загальний вид електричної схеми та обмоток збудження двигуна постійного струму зображені на рисунку 2.1[4].

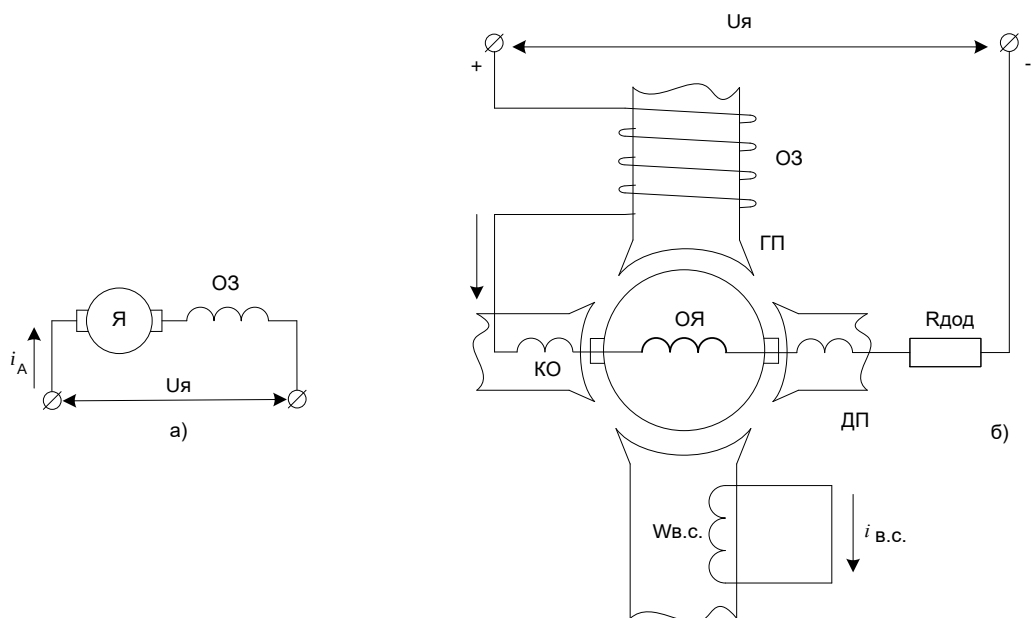


Рисунок 2.1 – Схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

При прийнятій апроксимації кривої намагнічування (рисунок 2.2) механічна:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi(I_{\text{я}})} - \frac{MR_{\text{я}} \Sigma}{\kappa^2 \Phi^2(I_{\text{я}})} \quad (2.1)$$

та електромеханічна:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi(I_{\text{я}})} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \Phi(I_{\text{я}})} \quad (2.2)$$

характеристики при різних струмах якоря мають різні вирази. При $I_{\text{я}} < I_{\text{гр}} \kappa_{\phi} = \text{const}$ ці рівняння перетворюються до виду:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\sqrt{\kappa \kappa_{\phi}} \kappa \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \kappa_{\phi}} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \kappa_{\phi} I_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \kappa_{\phi}} \quad (2.4)$$

При $I_{\text{я}} > I_{\text{гр}} \Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$ і ті ж рівняння записуються так:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} M, \quad (2.5)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} I_{\text{я}}. \quad (2.6)$$

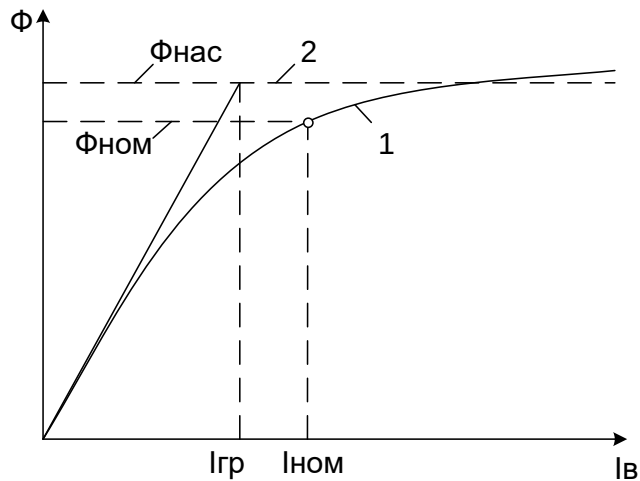


Рисунок 2.2 – Характеристика намагнічування $\Phi(I_{\epsilon})$

Рівняння (2.3) та (2.4) свідчать про те, що в області навантаження, що менше номінального, статичні характеристики двигуна послідовного збудження мають гіперболічний характер і при $M \rightarrow 0$ та $I \rightarrow 0$ асимптотично наближуються до вісі координат. Ця форма характеристики визначається умовами електричної рівноваги машини: при ідеальному холостому ході $I_{\text{я}} = 0$ ЕРС двигуна повинна урівноважувати прикладену до якірного кола напругу $U_{\text{я}}$. Так при $I_{\text{я}} \rightarrow 0$ потік Φ також прямує до нуля, виконання умови:

$$E = \kappa \Phi \omega = U_{\text{я}} \quad (2.7)$$

можливе тільки при необмеженому зростанні швидкості. На справі швидкість ідеального холостого ходу двигуна з послідовним збудженням завдяки наявності залишкового потоку $\Phi_{\text{зал}}$ обмежена значенням $\omega_0 = U_{\text{я}} / \Phi_{\text{зал}}$.

Однак $\Phi_{\text{зал}}$ настільки малий, та значення ω_0 набагато перевищує допустиме для двигуна за умовами механічної тривкості. Тому при проектуванні та

експлуатації електроприводів з двигунами послідовного збудження необхідно виключити можливість їх роботи з малими навантаженнями, при яких швидкість двигуна може перевищувати допустиму за умовами механічної тривкості[5].

Форма природної механічної характеристики двигуна з послідовним збудженням дозволяє при зниженні навантаження підвищувати мінімальну швидкість в 1,5-2 рази, забезпечувати підвищення продуктивності при заданій потужності двигуна. При цьому важливою перевагою двигуна є підвищена перевантажувальна спроможність.

В зв'язку з нелінійністю кривої намагнічування розрахувати природні характеристики двигуна з послідовним збудженням тільки за його номінальними даними неможливо, тому при проектуванні слід користуватися природними характеристиками $\omega = f(I_a)$ і $M = f(I_a)$, що наведені в каталогах (рисунок 2.3).

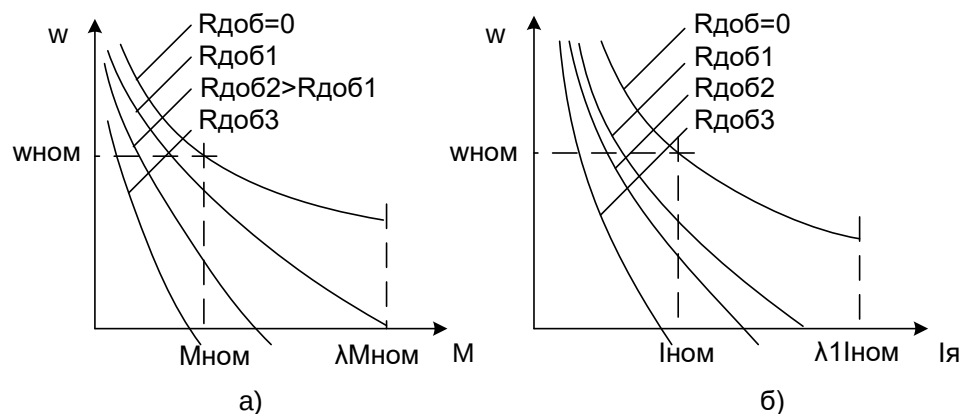


Рисунок 2.3 – Механічні (а) та електромеханічні (б) статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

Статична жорсткість механічної характеристики двигуна послідовного збудження залежить від навантаження. При малому навантаженні двигун має м'яку характеристику, з зростанням навантаження модуль жорсткості зростає і при $M \geq M_{НОМ}$ прямує до сталого значення, яке визначається:

$$\beta = \kappa^2 \Phi_{nac}^2 / R_{я\Sigma}. \quad (2.8)$$

Відповідно введення додаткового опору зменшує жорсткість механічних характеристик. Реостатні механічні та електромеханічні характеристики показані на рисунку 2, а, б разом з природними характеристиками, відповідаючи ми $R_{\partial\partial}=0$, на якому бачимо, що введення додаткового опору в коло якоря дозволяє обмежити момент та струм короткого замикання двигуна.

Для побудови структурної схеми двигуна постійного струму послідовного збудження використовуємо систему рівнянь, які описують його поведінку:

$$\begin{cases} U_{я} = L_{\Sigma} \frac{dI_{я}}{dt} + r_{\Sigma} \cdot I_{я} + E \\ M_{\partial\partial} - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ E = C_M \Phi \omega \\ M_{\partial\partial} = C_M \Phi I_{я} \end{cases}, \quad (2.9)$$

де $U_{я}$ – напруга живлення двигуна;

$I_{я}$ – струм двигуна;

r_{Σ} – загальний активний опір обмоток двигуна;

ω – кутова частота обертання якоря двигуна;

$M_{\partial\partial}$ – електромеханічний момент двигуна;

Φ – магнітний потік двигуна;

C_M – електромеханічна стала двигуна;

E – електрорушійна сила.

Структурна схема електропривода постійного струму зображена на рисунку

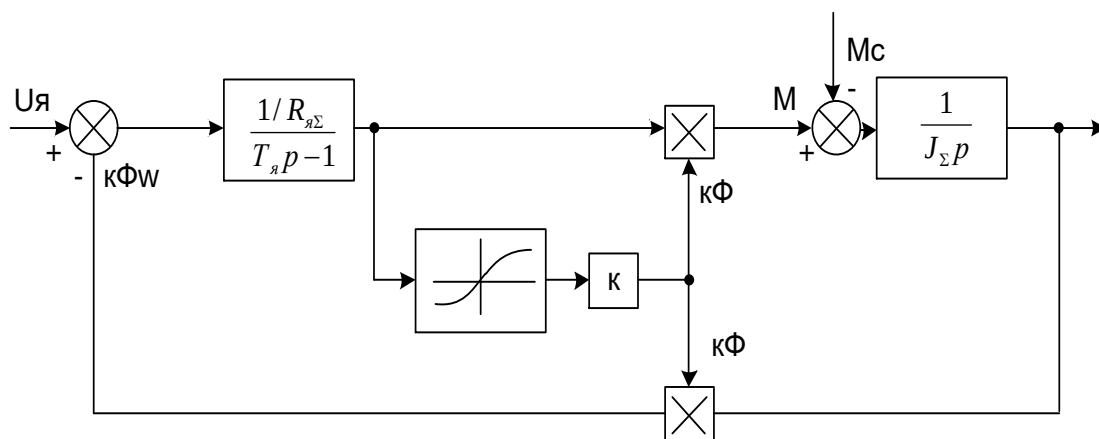


Рисунок 2.4 — Структурна схема електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження.

Таблиця 2.1 – Технічні параметри двигуна ТЕ-006

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	123
Номінальна напруга, В	197
Номінальний струм якоря, А	750
Номінальна швидкість обертання, об/хв.	295
Число активних провідників	348
Число пар паралельних гілок а	2
Число пар полюсів р	2
Число витків обмотки збудження	18
Опір якоря, Ом	0,0076
Опір обмотки додаткових полюсів, Ом	0,0047
Опір обмотки збудження, Ом	0,0077
Діаметр якоря, м	0,986
Маса якоря, кг	1200

Розрахунок сумарного опору якірного ланцюга:

$$R_{яЕ} = R_{я} + R_{Г.П} + R_{Д.П}, \quad (2.10)$$

де $R_{я}$ - опір якоря;

$R_{Г.П}$ - опір котушок головних полюсів;

$R_{Д.П}$ - опір котушок допоміжних полюсів;

$R_{к.О}$ - опір котушок компенсаційної обмотки.

$$R_{яЕ} = 0,0076 + 0,0047 + 0,0077 = 0,02 \text{ Ом.}$$

Індуктивність якірного ланцюга

$$L_{я} = \frac{0,25 U_H 60}{2 p n I_H \pi}, \quad (2.11)$$

де U_H – номінальна напруга двигуна;

I_H – номінальний струм двигуна;

n – номінальна частота обертання об/хв.;

p – число пар полюсів.

$$L_{я} = \frac{0,25 \cdot 197 \cdot 60}{2 \cdot 2 \cdot 295 \cdot 750 \cdot 3,14} = 0,00106 \text{ Гн.}$$

Електромеханічна стала двигуна

$$C_m = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (2.12)$$

де N – число ефективних провідників;

a – число паралельних гілок.

$$C_m = \frac{2 \cdot 348}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} = 55,41.$$

Магнітний потік двигуна

$$\Phi_n = \frac{M}{C_m \cdot I_n}, \quad (2.13)$$

де M – номінальний момент двигуна;

I_n – номінальний струм двигуна.

$$\Phi_n = \frac{4330}{55,41 \cdot 750} = 0,1042 \text{ Вб}.$$

Для розрахунку індуктивності обмотки збудження L_{oz} потрібно розрахувати потокозчеплення обмотки збудження Ψ

$$\psi = W \cdot \Phi_n \cdot \sigma, \quad (2.14)$$

де W – кількість витків обмотки збудження;

Φ – магнітний потік двигуна;

σ – коефіцієнт розсіювання полюсів.

$$\psi = 18 \cdot 0,1042 \cdot 1,2 = 2,25 \text{ Гн}.$$

$$L_{oz} = \frac{\psi}{I_{oz}}, \quad (2.15)$$

де I_z – струм збудження двигуна.

$$L_{oz} = \frac{2,25}{750} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Сумарна індуктивність обмоток двигуна:

$$L_{\Sigma} = L_{я} + L_{оз} + L_{дп},$$

де $L_{я}$ - індуктивність якоря;

$L_{оз}$ - індуктивність обмотки збудження;

$L_{дп}$ - індуктивність обмотки додаткових полюсів (приймаємо 20% від індуктивності обмотки збудження).

$$L_{\Sigma} = 1,06 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 4,66 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Електромагнітна стала часу:

$$T_e = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}. \quad (2.16)$$

$$T_e = \frac{4,66 \cdot 10^{-3}}{0,02} = 0,233 \text{ с.}$$

Момент інерції якоря

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (2.17)$$

де m – маса якоря;

R – радіус якоря.

$$J = \frac{0,493^2 \cdot 1200}{2} = 145 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Таблиця 2.2 – Крива намагнічування двигуна ТЕ-006

$I_{я}$	187,5	375	562,5	750	937,5	1125
Φ	0,052	0,079	0,094	0,1042	0,11	0,116

За даними таблиці побудуємо криву намагнічування двигуна (рисунок 2.5).

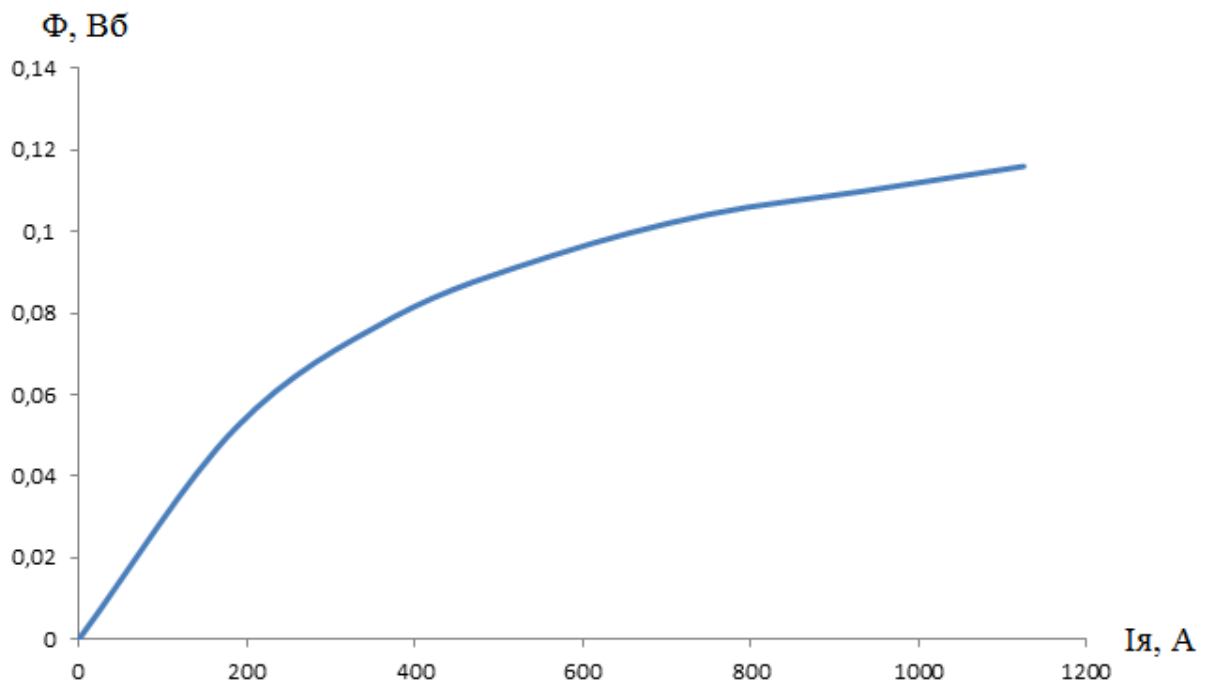


Рисунок 2.5 – Крива намагнічування двигуна TE-006

При протіканні струму у обмотці збудження створюється магнітний потік, частина якого розсіюється – це має назву потік розсіювання. Цей потік визначається за формулою:

$$\Phi_S = -W \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.18)$$

де W - число витків обмотки збудження;

Φ – основний магнітний потік.

На рисунку 2.6 представлена математична модель двигуна постійного струму послідовного збудження, зроблена за допомогою програмного забезпечення Matlab 12.

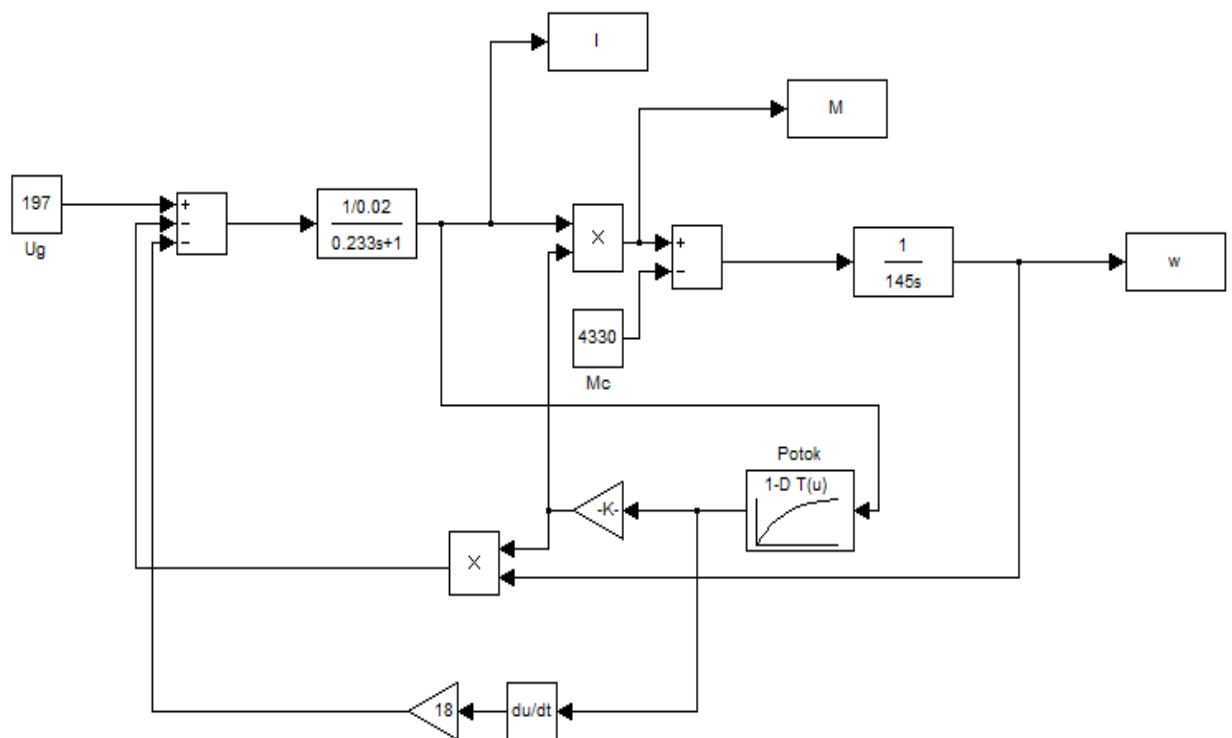


Рисунок 2.6 – Математична модель двигуна постійного струму послідовного збудження

На рисунках 2.7 та 2.8 зображені кутова швидкість та момент на валу відповідно при прямому пуску двигуна.

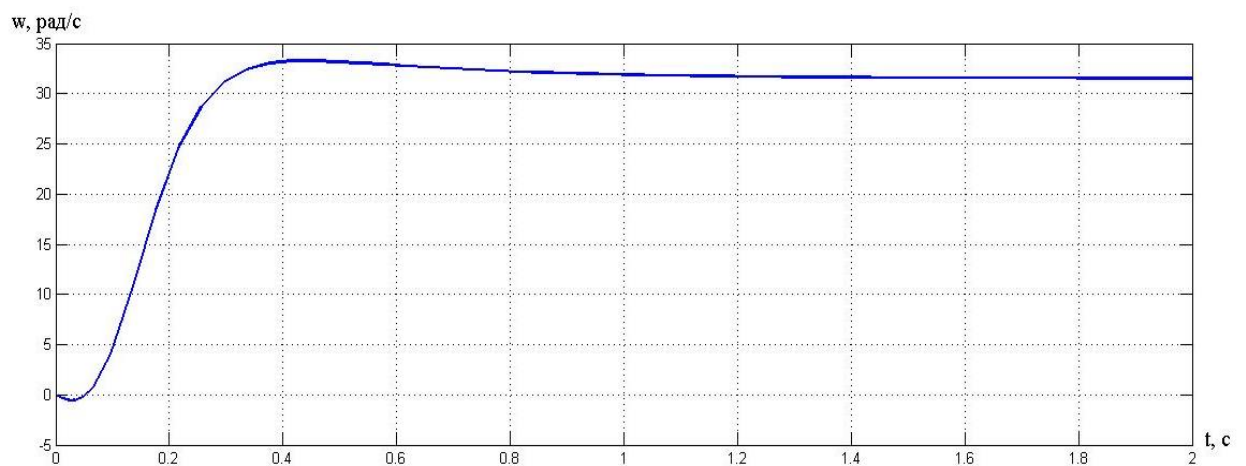


Рисунок 2.7 – Кутова швидкість двигуна при прямому пуску

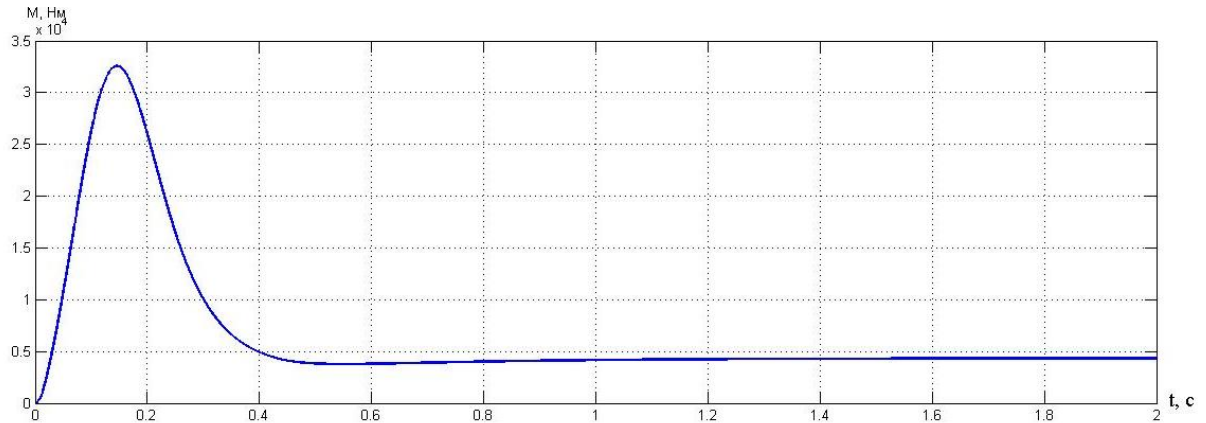


Рисунок 2.8 – Момент двигуна при прямому пуску

2.2 Математичне моделювання генератора постійного струму TD-802

На маневровому тепловозі ЧМЕЗ встановлений тяговий генератор постійного струму незалежного збудження. Його функціональна електромеханічна та електрична схеми представлені на рисунку 2.9.

Величина е.р.с., що виробляється генератором, прямо пропорційна магнітному потоку Φ , створюваному головними полюсами, і частоті обертання якоря n , згідно формули 2.19[6].

Напруга на виводах генератора менше його е.р.с. на величину падіння напруги в колі якоря. Падіння напруги в колі якоря визначається за законом Ома і дорівнює добутку струму якоря I_g на опір кола якоря R_{s_g} . Отже, напруга на виводах генератора

$$U_g = E_g - I_g \cdot R_{s_g}, \quad (2.19)$$

де E_g – едс генератора;

I_g – струм кола якоря;

R_{s_g} – опір кола якоря.

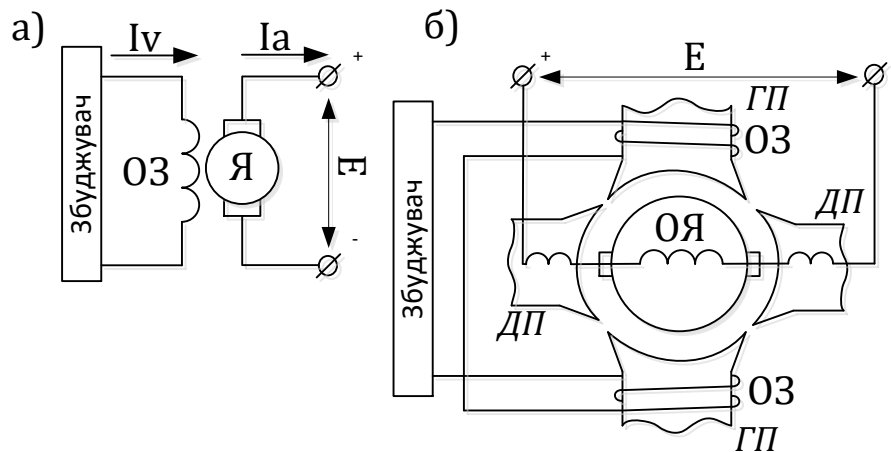


Рисунок 2.9 – Спрощена електрична схема генератора постійного струму з незалежним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

Загальний опір кола якоря складається з опорів обмотки якоря, послідовної обмотки збудження, обмотки додаткових полюсів, щіток і переходів між колектором і щітками.

Падіння напруги в ланцюзі якоря дуже невелике, тому що опір обмотки якоря мале. Тому напруга генератора буває лише незначно менше його е.р.с.

Потужність, що віддається генератором, завжди менше потужності, що витрачається на обертання якоря і збудження, тому що всередині генератора відбуваються втрати енергії. До цих втрат відносяться механічні втрати (тертя в підшипниках, тертя колектора та щітки), втрати на нагрів проводів обмотки якоря і обмотки збудження, магнітні втрати і т. д.

Відношення корисної потужності генератора, тобто тієї, яку він віддає в зовнішній ланцюг, до потужності, що витрачається для приводу генератора, називають коефіцієнтом корисної дії генератора. Якщо тяговий генератор тепловоза працює з повним навантаженням, його ККД досягає 94-95 %, тобто втрати в ньому досить малі.

Для збудження (створення робочого магнітного потоку в електричних машинах) генератора по обмотці його головних полюсів пропускають струм збудження. У генераторах з незалежним збудженням обмотка збудження

отримує живлення від стороннього джерела електричної енергії, в тепловозі від іншого генератора постійного струму – збуджувача[7].

Тяговий генератор тепловоза забезпечує використання номінальної потужності дизеля тепловоза. Дизель розвиває таку потужність, яку вимагає від нього генератор. Якщо генератор з якихось причин буде розвивати невелику потужність, то регулятор двигуна, підтримуючи постійною частоту обертання колінчастого вала, за допомогою рейок паливних насосів зменшить подачу палива в циліндри. Дизель буде недовантажений. Тепловоз зовсім не зможе вести поїзд, або поведе його із зниженою швидкістю. Отже, характеристика тягового генератора значною мірою визначає тягові якості локомотива.

Тепловоз з поїздом рухається по різному за профілем шляху. У процесі руху на підйомі швидкість поїзда зазвичай зменшується, на ухилі або рівному профілю після підйому – збільшується. При цьому швидкість може змінюватися в кілька разів. Зміна швидкості руху призводить до зміни в широких межах режиму роботи та струму, споживаного тяговими електродвигунами від генератора. Отже, струм I_g генератора при роботі дизеля на номінальній потужності буде значно змінюватися в залежності від швидкості руху локомотива. Легко здогадатися, що для підтримання сталості потужності тягового генератора в разі зміни струму необхідно обернено пропорційно змінювати напругу U_g генератора. Наприклад, якщо швидкість тепловоза зменшилася і струм в тягових двигунах і генераторі збільшився в два рази, то напруга генератора повинно знизитися також у два рази. Добуток струму генератора на його напругу залишиться постійною, отже, потужність, що виробляється тяговим генератором, також залишиться постійною.

Однак струм і напруга тягового генератора можуть змінюватися лише в певних межах. Максимальна напруга генератора не може бути перевищена за умовами магнітного насичення системи збудження, міцності ізоляції електричної машини, напруги між колекторними пластинами. Струм

генератора також обмежений певним граничним значенням. У разі подальшого збільшення струму станеться перегрів обмотки якоря, колектора, почнеться іскріння під щітками, генератор може вийти з ладу.

Зобразимо необхідну зовнішню характеристику тягового генератора, тобто залежність його напруги від струму представлено на рисунку 2.10.

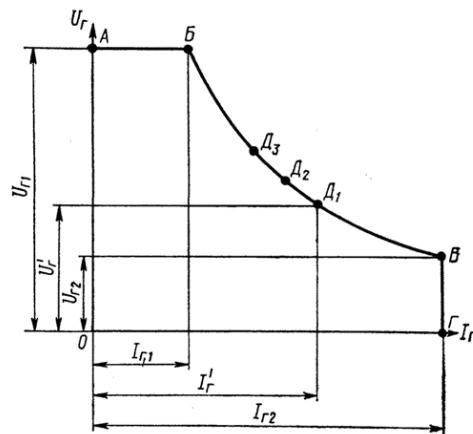


Рисунок 2.10 – Зовнішня характеристика тягового генератора

Необхідна зовнішня характеристика тягового генератора може бути представлена кривою АБВГ. Основною робочою частиною характеристики є ділянка БВ, на якій напруга тягового генератора змінюється обернено пропорційно току генератора і його потужність зберігається постійною. Після того як струм зменшився до величини $I_{Г1}$ (точка Б характеристики), а напруга зросла до гранично допустимого значення $U_{Г1}$, подальшого зростання напруги із зменшенням струму не відбувається. Ділянка кривої АБ характеризує обмеження потужності генератора по напрузі. У разі коли струм досягає гранично допустимої величини, напруга генератора починає різко зменшуватися, попереджаючи подальше збільшення струму. Ділянка характеристики ВГ є обмеженням за величиною максимального струму генератора.

Для побудови структурної схеми генератора постійного струму незалежного збудження використовуємо систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\begin{cases} U_{ag} = E_g - L_{sg} \cdot \frac{dI_{ag}}{dt} + R_{sg} \cdot I_{ag} \\ U_{vg} = L_{vg} \cdot \frac{dI_{vg}}{dt} + R_{vg} \cdot I_{vg} \\ E_g = k_g \cdot \Phi_g \cdot \omega_{dis} \\ M_n = k_g \cdot \Phi_g \cdot I_{ag} \end{cases}, \quad (2.20)$$

де U_{ag} – напруга живлення тягових двигунів, В;

U_{vg} – напруга живлення обмотки збудження генератора, В;

E_g - електрорушійна сила генератора, В;

I_{ag} – струм якірного кола генератора, А;

R_{sg} - загальний активний опір обмоток якірного кола генератора, Ом;

L_{sg} - загальна індуктивність всіх обмоток якірного кола генератора, Гн;

I_{vg} – струм кола збудження генератора, А;

R_{vg} - активний опір обмотки збудження генератора, Ом;

L_{vg} - індуктивність обмотки збудження генератора, Гн;

Φ_g - магнітний потік генератора, Вб;

ω_{dis} - кутова частота обертання якоря генератора, рад/с;

M_n – момент навантаження дизеля, Н·м;

k_g - електромеханічна постійна двигуна.

На основі цієї системи складаємо структурну схему у вигляді блоків:

У системі регулювання напруги керуючим впливом є зміна величини напруги збудження генератора і зміна частоти обертання вала дизель-генератора. Зовнішній збуджуючий вплив - це падіння напруги в тяговому колі генератор-двигун. Регульованою величиною є напруга живлення тягового електродвигуна. Таким чином, тяговий генератора має три вхідних сигнали і

один вихідний сигнал. Структурна схема тягового генератора наведена на рисунку 2.11.

Для побудови математичної моделі генератора розрахуємо всі його невідомі параметри, що входять до структурної схеми.

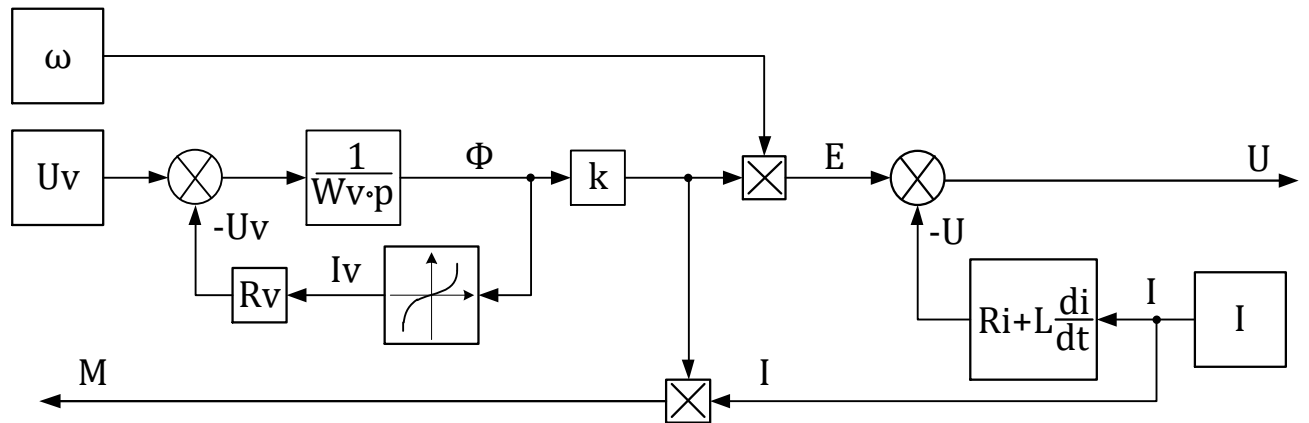


Рисунок 2.11 - Структурна схема генератора постійного струму з незалежним збудженням

Розрахунок сумарного опору якрного ланцюга генератора:

$$R_{sg} = (R_{ag} + R_{dpg}) \cdot k_{\text{міді}}, \quad (2.21)$$

де $R_{ag} = 0,0017$ – опір обмотки якоря генератора, Ом;

$R_{dpg} = 0,0017$ - опір котушок допоміжних полюсів генератора, Ом;

$k_{\text{міді}} = 1,24$ – коефіцієнт збільшення опору міді при нагріванні.

$$R_{sg} = (0,0017 + 0,0017) \cdot 1,24 = 0,0042.$$

Розрахунок електромеханічної сталої генератора проводимо за формулою

$$k_g = \frac{p_g \cdot N_g}{2 \cdot \pi \cdot a_g}, \quad (2.22)$$

де $N_g = 750$ – число ефективних провідників;

$p_g = 5$ – число пар головних полюсів генератора;

$a_g = 5$ - число паралельних гілок.

$$k = \frac{5 \cdot 750}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} = 128,91.$$

$$\omega_{dis} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{dis}}{60}, \quad (2.23)$$

$$\omega_{dis} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{60} = 78,54 \text{ рад/с},$$

Розрахунок індуктивності якірного ланцюга генератора:

$$L_{sg} = \frac{C \cdot U_{нг}}{I_{нг} \cdot n_g \cdot p_g} \cdot \frac{3}{2 + I_{ag}/I_{нг}}, \quad (2.24)$$

де $C = 6$ – для машин без компенсаційної обмотки;

$U_{нг} = 377$ - номінальна напруга двигуна, В;

$I_{нг} = 2350$ - номінальний струм двигуна, А;

I_a – поточне значення струму якоря двигуна, А;

$n = 750$ – номінальна частота обертання, об/хв.;

$p = 5$ - число пар полюсів двигуна.

Так як поточне значення струму якоря двигуна змінюється в часі, в формулі (2.24) окремо знайдемо постійні коефіцієнти

$$K_{La_g} = \frac{3 \cdot C \cdot U_{нг}}{I_{нг} \cdot n_g \cdot p_g}, \quad (2.25)$$

$$K_{La_g} = \frac{3 \cdot 6 \cdot 377}{2350 \cdot 750 \cdot 5} = 0,00077.$$

$$K_{La1_g} = \frac{1}{I_{ng}}, \quad (2.26)$$

$$K_{La1_g} = \frac{1}{2350} = 0,000425.$$

Тоді формула (2.24) буде мати вигляд

$$L_{sg} = K_{La_g} \cdot \frac{1}{2 + I_{ag} \cdot K_{La1_g}}, \quad (2.27)$$

Розрахунок ЕРС двигуна виконується за формулою

$$E_g = k_g \cdot \Phi_g \cdot \omega_{dis}, \quad (2.28)$$

$$E = 128,9 \cdot 0,04 \cdot 78,53 = 404,9 \text{ В.}$$

За допомогою стандартних блоків збираємо в середовищі Simulink математичну модель тягового генератора постійного струму з незалежним збудженням TD-802 маневрового тепловоза ЧМЕЗ, зроблена за допомогою програмного забезпечення Matlab 12.

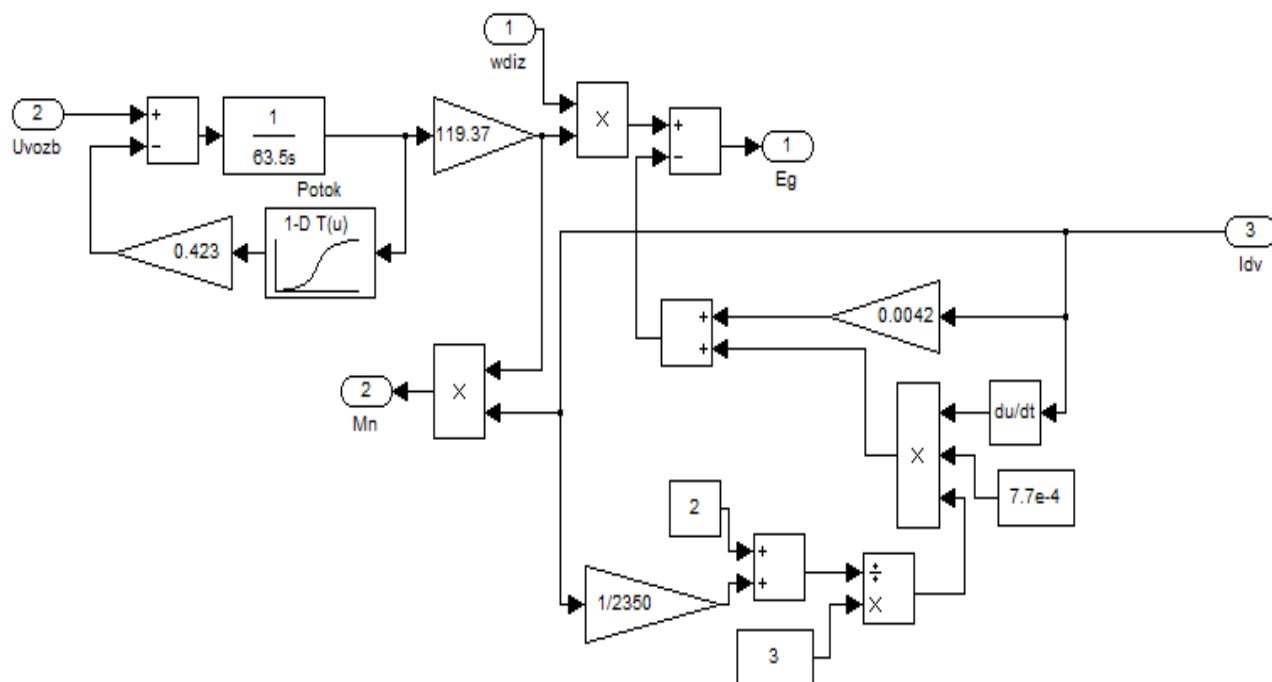


Рисунок 2.12 - Математична модель генератора постійного струму з незалежним збудженням

На рисунках 2.13, 2.14 показані відповідно характеристика моменту навантаження на валу дизеля та напруга живлення тягових двигунів при прямому пуску генератора з номінальними параметрами.

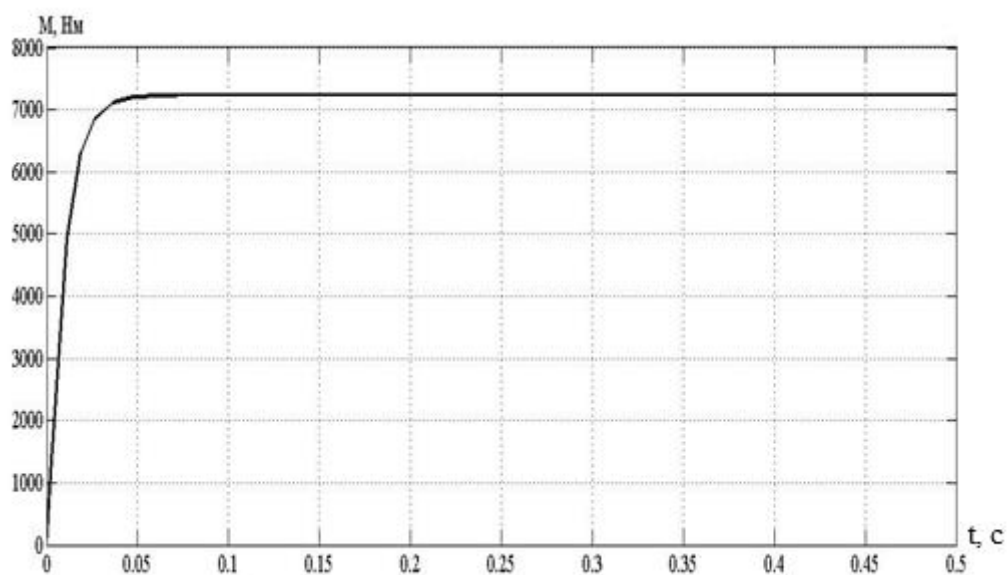


Рисунок 2.13 – Характеристика моменту навантаження на валу дизеля

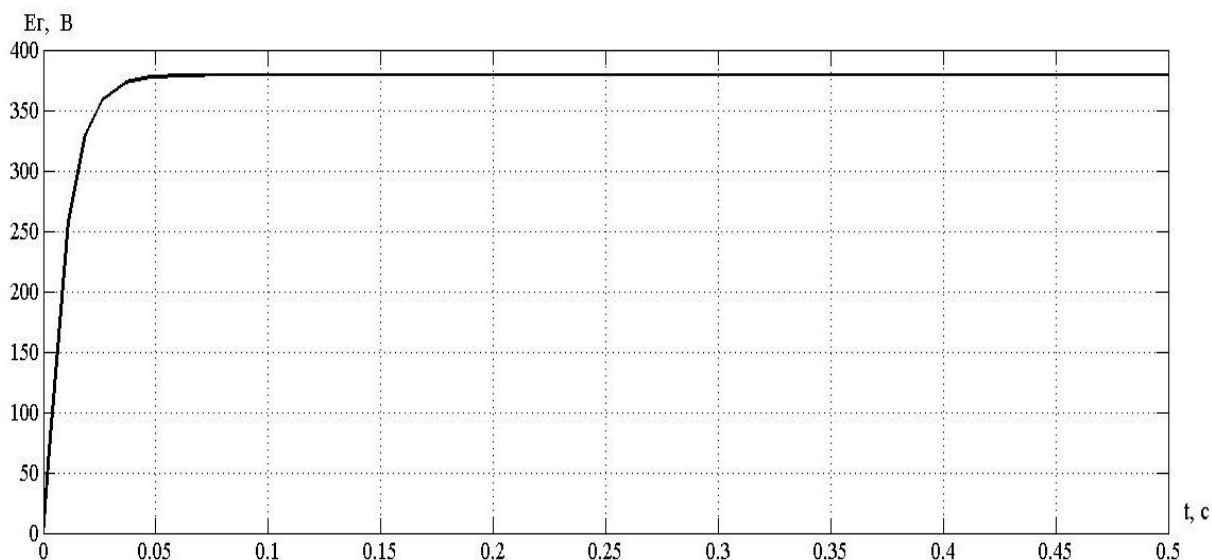


Рисунок 2.14 – Характеристика напруги живлення тягових двигунів

2.3 Математичне моделювання збуджувача тягового генератора

На обмотку збудження подається напруга від збуджувача – машини постійного струму.

Вихідна напруга збуджувача залежить від швидкості обертання вала дизеля, яка в свою чергу залежить від позиції контролера машиніста[9].

Номінальні параметри збуджувача, в залежності від позиції контролера машиніста зведені до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Номінальні параметри збуджувача, в залежності від позиції контролера машиніста

Позиція контролера машиніста	Напруга на затискачах збуджувача, В
1	2
1	45
2	48
3	53

Продовження таблиці 2.3

1	2
4	57
5	62
6	68
7	76
8	90

За допомогою стандартних блоків збираємо в середовищі Simulink блок завдання збудження тягового генератора – блок залежності напруги збудження від завдання швидкості обертання дизель-генераторної установки. Математична модель представлена на рисунку 2.15.

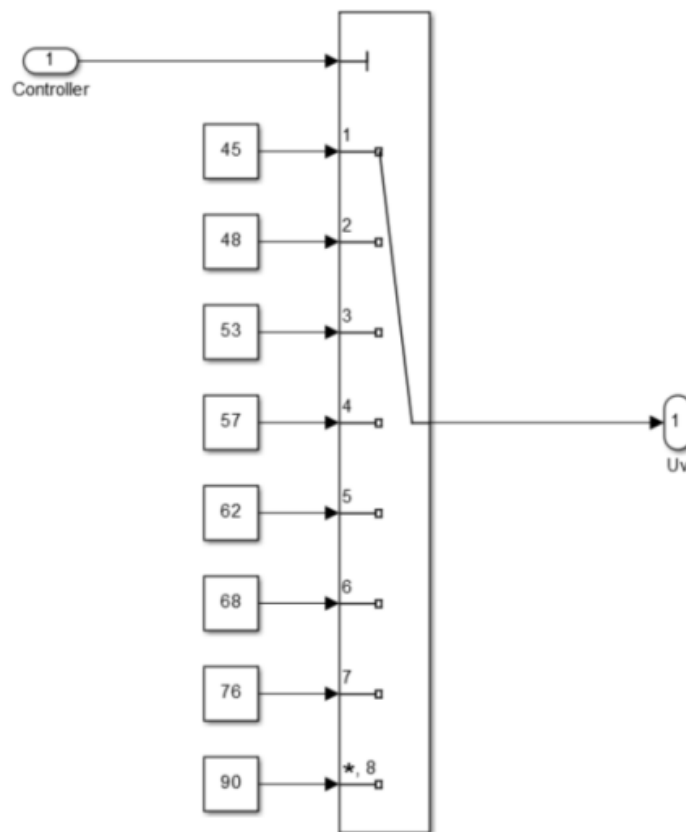


Рисунок 2.15 – Математична модель блока завдання напруги збудження тягового генератора

2.4 Математичне моделювання дизеля

На тепловозах ЧМЕЗ встановлений чотиритактний дизель K6S310DR з вертикальним розміщенням циліндрів та водяним охолодженням. Буква К означає, що дизель має наддув. Основні технічні характеристики дизеля наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики дизеля K6S310DR

Найменування параметру	Значення
Номінальна потужність, кВт	993
Номінальна частота обертання колінчастого валу, об/хв	750
Кількість циліндрів	6
Діаметр розточки циліндрів, мм	310
Хід поршня, мм	360
Повний об'єм циліндрів, л	177
Ступінь стискання	13
Діапазон робочих частот, об/хв	350-750

В основу імітаційної моделі дизеля покладена індикаторна діаграма його роботи. Дані, що наведені у таблиці 2.2 є вхідними для розрахунку та побудови діаграми.

2.4.1 Розрахунок та побудова індикаторної діаграми дизеля K6S310DR

Процеси, що відбуваються в циліндрах поршневого двигуна, можуть бути зображені у вигляді індикаторної діаграми. Індикаторна діаграма – це графічне відображення зміни тиску газу в циліндрі поршневого двигуна в залежності від переміщення поршня або кута повороту кривошипу.

2.4.1.1 Розрахунок процесу газообміну

Цей процес складається з визначення тиску газів у кінці впуску p_a , коефіцієнта надлишкових газів γ_r , температури газів в кінці впуску T_a і коефіцієнта наповнення свіжим зарядом η_v .

Тиск у кінці впуску, МПа:

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi_{en}) \cdot \frac{\omega_{en}^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}, \quad (2.29)$$

де P_o – тиск навколишнього середовища, МПа;

$(\beta^2 + \xi_{en})$ – сумарний коефіцієнт, що враховує гасіння швидкості β і опір впускної системи ξ_{en} ;

ω_{en} – середня швидкість руху заряду у прохідному перерізі впускної системи, м/с;

ρ_0 – густина заряду за відомих атмосферних умов, кг/м³:

$$\rho_0 = \frac{P_o \cdot 10^6}{R_n \cdot T_o}, \quad (2.30)$$

де R_n – газова стала повітря, Дж/(кг·К);

T_o – температура навколишнього середовища, К.

Коефіцієнт надлишкових газів:

$$\gamma_r = \frac{T_o + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}, \quad (2.31)$$

де ΔT – підвищення температури заряду у процесі впуску, К;

T_r – температура газів на випуску, К;

P_r – тиск в кінці випуску, МПа;

ε – ступінь стиску;

P_a – тиск в кінці впуску, МПа.

Температура в кінці впуску, К:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}, \quad (2.32)$$

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_v = \frac{\varepsilon P_a}{P_0(\varepsilon - 1)} \cdot \frac{T_0}{T_0 + \Delta T}, \quad (2.33)$$

2.4.1.2 Розрахунок процесу стискання

Тиск у кінці стискання, МПа:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}, \quad (2.34)$$

де n_1 – показник політропи стискання.

Значення показника політропи стискання визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,788 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{k_1 - 1} + 1) \cdot T_a}, \quad (2.35)$$

де k_1 – показник адіабати, що визначається з номограми наведеної на рисунку 2.16.

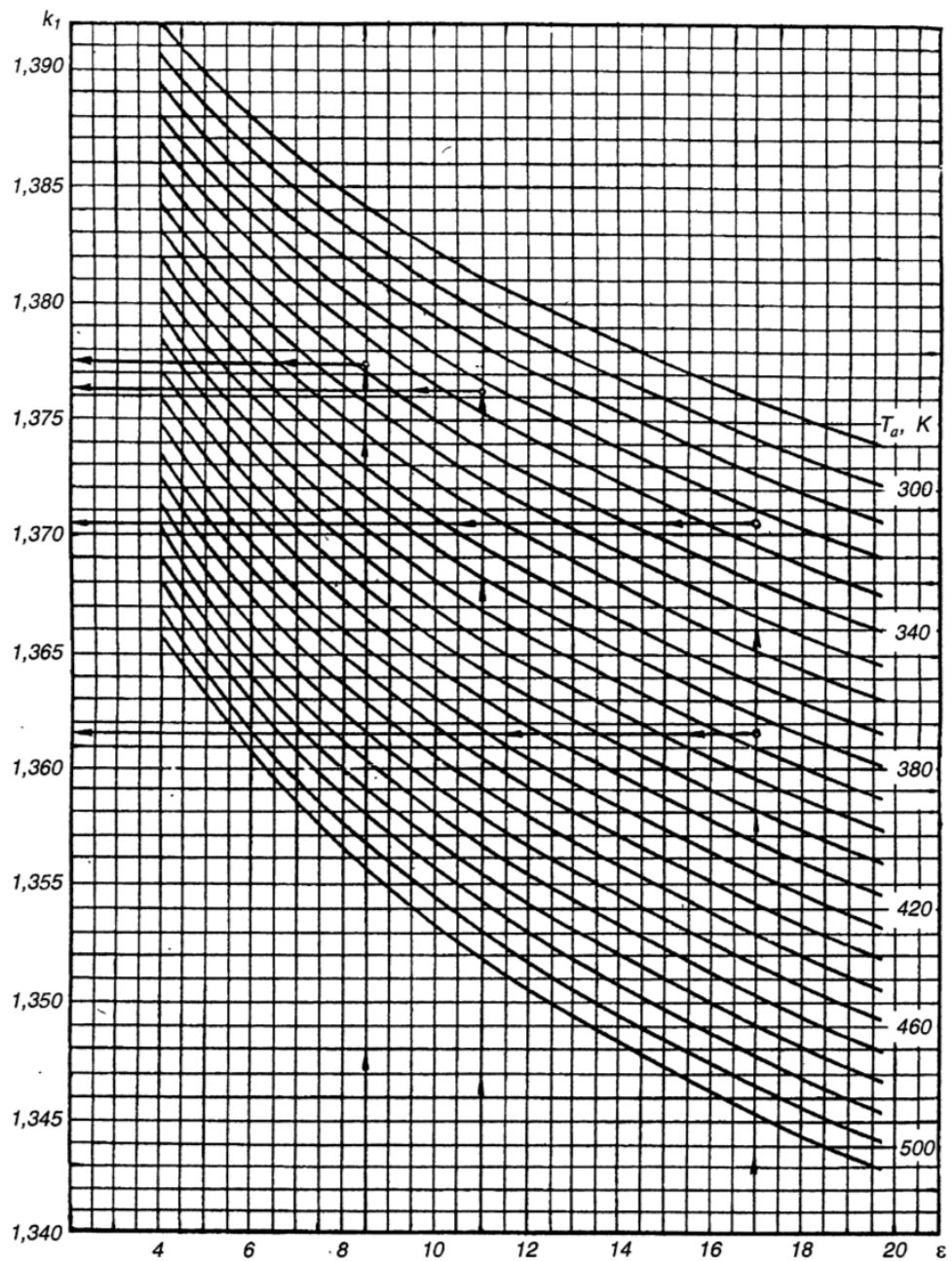


Рисунок 2.16 – Номограма для визначення показника адіабати стиснення k_1

Температура в кінці стискання, К:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1 - 1}, \quad (2.36)$$

2.4.1.3 Розрахунок процесу згоряння

Для процесу згоряння слід визначити:

1 Теоретично необхідну кількість повітря для згоряння палива, кмоль/кг:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \quad (2.37)$$

де C , H та O – маса відповідно вуглецю, водню і кисню в 1 кг палива.

2 Кількість водяної пари в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}, \quad (2.38)$$

3 Кількість молей азоту в продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot L_0, \quad (2.39)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря.

4 Справжню кількість повітря і свіжого заряду, кмоль/кг:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0, \quad (2.40)$$

5 Кількість кисню у продуктах згоряння, кмоль/кг:

$$M_{O_2} = 0,21 \cdot L_0 \cdot (\alpha - 1), \quad (2.41)$$

6 Кількість вуглекислого газу у продуктах згоряння кмоль/кг:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12}, \quad (2.42)$$

7 Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль/кг:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{H_2O} + M_{N_2}, \quad (2.43)$$

8 Зміну кількості молей горючої суміші під час її згоряння:

$$\Delta M = M_2 - M_1, \quad (2.44)$$

9 Теоретичний коефіцієнт молекулярної зміни горючої суміші:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}, \quad (2.45)$$

10 Справжній коефіцієнт молекулярної зміни робочої суміші:

$$\mu = \frac{M_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}, \quad (2.46)$$

11 Середню молярну теплоємність горючої суміші за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_v = 20,038 + 2,554 \cdot 10^{-3} T_c, \quad (2.47)$$

12 Середню молярну теплоємність горючої суміші за сталого тиску, кДж/(кмоль·К):

$$mC_p = mC_v + 8,314, \quad (2.48)$$

13 Середню молярну теплоємність продуктів згоряння за сталого об'єму в кінці стиску, кДж/(кмоль х К):

$$mC_v'' = \frac{M_{CO_2} mC_{v_{CO_2}} + M_{CO} mC_{v_{CO}} + M_{H_2O} mC_{v_{H_2O}} + M_{N_2} mC_{v_{N_2}}}{M_2}, \quad (2.49)$$

де $M_{CO_2}, M_{CO}, M_{H_2O}, M_{N_2}$ – кількість молей відповідно вуглекислого газу, оксиду вуглецю, водяної пари та азоту у продуктах згоряння, кмоль/кг;
 $mC_{v_{CO_2}}, mC_{v_{CO}}, mC_{v_{H_2O}}, mC_{v_{N_2}}$ – середня молярна теплоємність відповідно вуглекислого газу, оксиду вуглецю, водяної пари та азоту у продуктах згоряння, кДж/(кмоль·К).

14 Кількість теплоти, втраченої внаслідок неповного згоряння 1 кг палива, кДж/кг:

$$\Delta H_{II} = 119 \cdot 10^3 \cdot (1 - \alpha) L_0, \quad (2.50)$$

15 Підставляємо отримані вирази mC_v'' та ΔH_{II} до рівняння, К:

$$\frac{\xi \cdot (H_{II} - \Delta H_{II})}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)} + mC_v T_c = \mu \cdot mC_v'' \cdot T_z, \quad (2.51)$$

де ξ – коефіцієнт використання теплоти;

H_{II} – нижча теплота згоряння кДж/кг.

Розв'язуємо здобуте квадратне рівняння і визначаємо температуру газів в кінці згоряння як додатне значення кореня квадратного рівняння.

Підставивши здобуте значення температури газів у кінці згоряння до (2.21), дістаємо значення середньої молярної теплоємності і продуктів у кінці згоряння за сталого об'єму mC_v'' .

16 Тиск газів у кінці згоряння, МПа:

$$P_z = \mu \cdot P_c \cdot \frac{T_z}{T_c}, \quad (2.52)$$

17 Ступінь підвищення тиску під час згоряння:

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}, \quad (2.53)$$

2.4.1.4 Розрахунок процесу розширення

Під час розрахунку визначають ступінь наступного розширення δ , тиск газів P_n та їх температуру T_n в кінці розширення.

Ступінь наступного розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}, \quad (2.54)$$

Тиск газів у кінці розширення, МПа:

$$P_n = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}, \quad (2.55)$$

де n – показник політропи розширення.

Значення показника політропи розширення визначається з наступної формули:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{k_2-1}}\right) \cdot T_a}, \quad (2.56)$$

де k_2 – показник адіабати розширення, який визначається з номограми наведеної на рисунку 2.17.

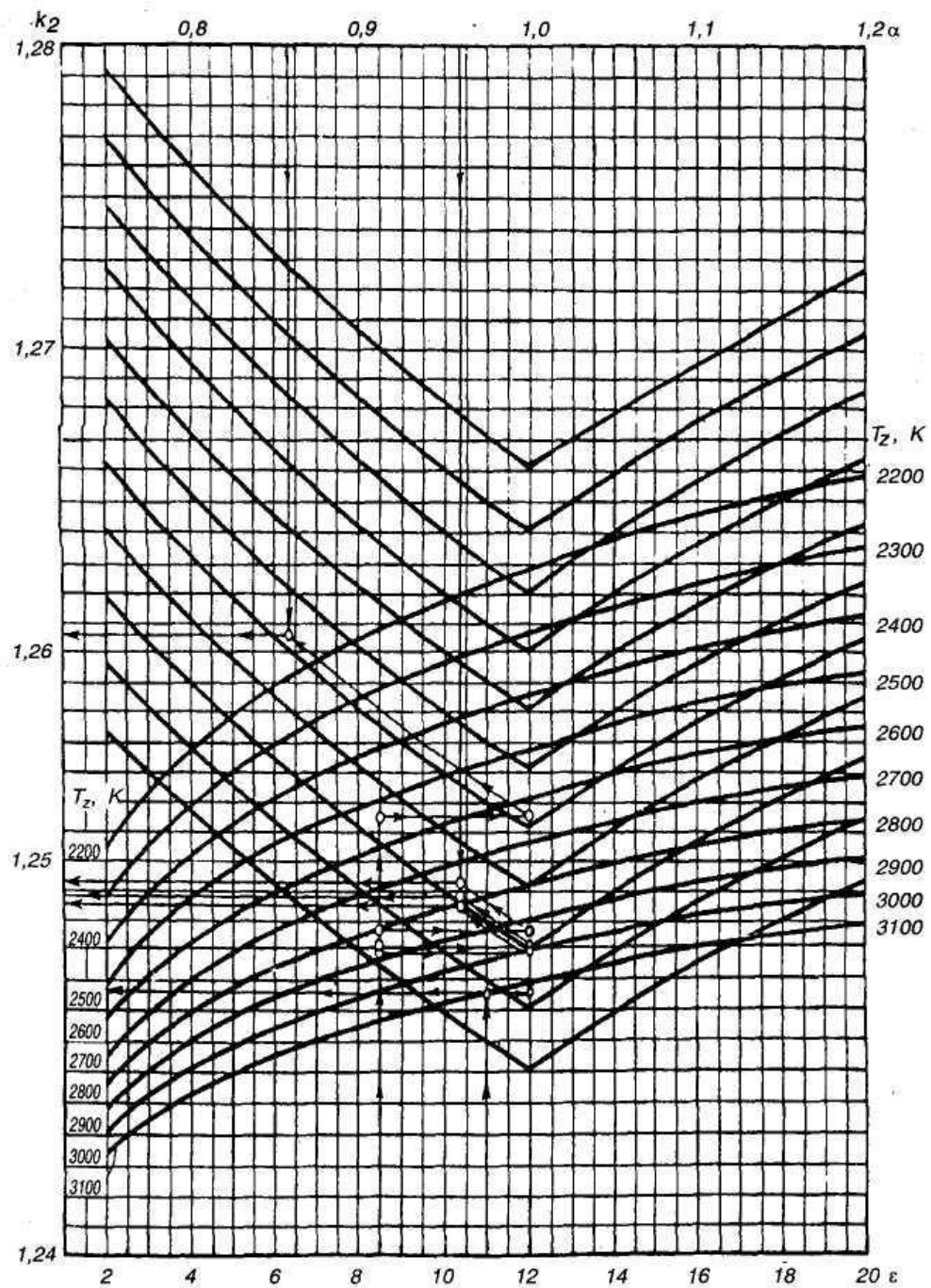


Рисунок 2.17 – Номограма для визначення показника адіабати розширення k_2

Температура газів у кінці розширення, К:

$$T_n = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}, \quad (2.57)$$

2.4.1.5 Побудова індикаторної діаграми

Індикаторну діаграму будують у вигляді залежності зміни тиску P у циліндрі двигуна від зміни об'ємів V під час переміщення поршня на підставі результатів, визначених у тепловому розрахунку.

За результатами розрахунку побудована індикаторна діаграми чотиритактного дизеля K6S310DR, що наведена на рисунку 2.18.

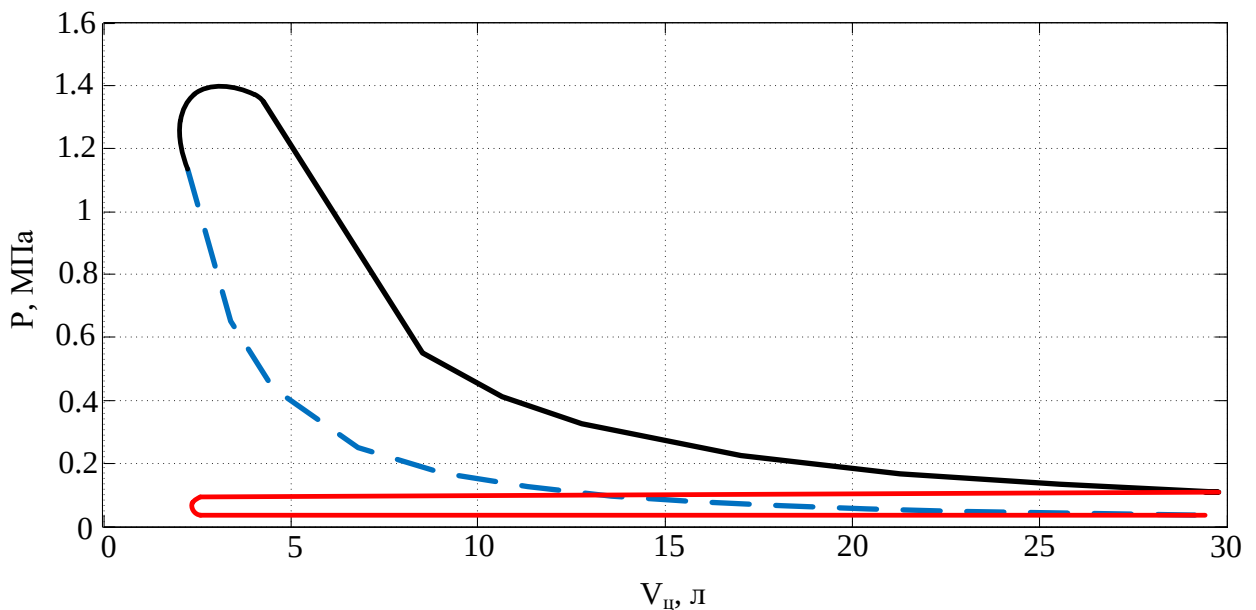


Рисунок 2.18 – Індикаторна діаграма роботи дизеля K6S310DR

Для подальшого створення моделі дизелю користування діаграмою у осях P та V досить незручним, тому наведену діаграму перетворено у діаграму в осях F та S , де F – сила, що діє на поршень, S – переміщення поршня. Діаграма залежності сили, що діє на поршень від переміщення наведена на рисунку 2.19.

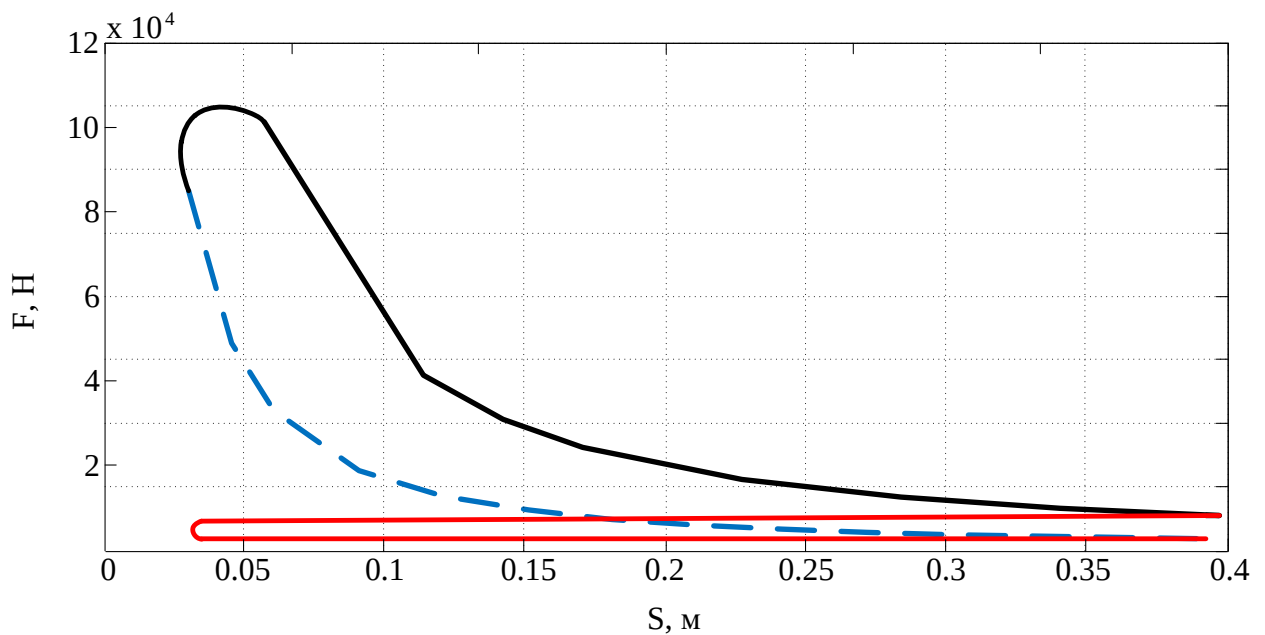


Рисунок 2.19 – Діаграма роботи дизеля K6S310DR

2.4.2 Апроксимація індикаторної діаграми

Отримані у результаті розрахунку значення для побудови індикаторної діаграми необхідно апроксимувати неперервними функціями для подальшого їх використання у створенні імітаційної моделі.

Одним зі способів апроксимації даних є інтерполяція. Задача інтерполяції полягає у наступному: задані точки (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$, необхідно знайти функцію $\varphi(x)$, яка проходить через ці точки, тобто

$$\varphi(x_i) = y_i, i = \overline{1, n}. \quad (2.58)$$

Точки (x_i, y_i) мають назву вузли інтерполяції, а функція $\varphi(x)$ – інтерполуюча функція або інтерполятор. На практиці в якості інтерполуючої функції $\varphi(x)$ найчастіше використовуються алгебраїчні поліноми різного виду, при цьому інтерполяція має назву поліноміальної.

Інтерполуюча функція має вигляд:

$$\varphi(x) = \varphi(\vec{C}, x) = C_0\varphi_0(x) + C_1\varphi_1(x) + \dots + C_m\varphi_m(x) = \sum_{k=0}^m C_k\varphi_k(x), \quad (2.59)$$

де $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$ – базисні функції.

Використовуючи умову (1) та вираз (2), отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \varphi(\vec{C}, x_0) = C_0\varphi_0(x_0) + C_1\varphi_1(x_0) + \dots + C_m\varphi_m(x_0) = y_0 \\ \varphi(\vec{C}, x_1) = C_0\varphi_0(x_1) + C_1\varphi_1(x_1) + \dots + C_m\varphi_m(x_1) = y_1 \\ \dots \\ \varphi(\vec{C}, x_n) = C_0\varphi_0(x_n) + C_1\varphi_1(x_n) + \dots + C_m\varphi_m(x_n) = y_n \end{cases} \quad (2.60)$$

Єдине рішення системи (3) існує при двох умовах:

- кількість точок (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$ дорівнює кількості коефіцієнтів C_k , $k = \overline{0, m}$;
- система рівнянь (3) повинна бути не виродженою, тобто визначник системи $\Delta \neq 0$.

Таким чином, якщо виконуються вищезазначені умови, то через точки (x_i, y_i) , проходить єдина функція $\varphi(x) = \sum_{k=0}^m C_k\varphi_k(x)$.

У випадку лінійної поліноміальної інтерполяції базисні функції мають наступний вигляд: $\varphi_0(x) = x^0 = 1$, $\varphi_1(x) = x^1 = x$, $\varphi_2(x) = x^2$, ..., $\varphi_m(x) = x^m$.

Інтерполююча функція при цьому має вигляд полінома ступеню m :

$\varphi(x) = P_m(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_mx^m$ і, як наслідок, система (3) має вигляд

$$\begin{cases} C_0 + C_1x_0 + C_2x_0^2 + \dots + C_nx_0^n = y_0 \\ C_0 + C_1x_1 + C_2x_1^2 + \dots + C_nx_1^n = y_1 \\ \dots \\ C_0 + C_1x_n + C_2x_n^2 + \dots + C_nx_n^n = y_n \end{cases} \quad (2.61)$$

У матричній формі систему (4) можна переписати, як

$$A \times C = B, \quad (2.62)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \dots & x_0^n \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ \dots & & & & \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^n \end{bmatrix} \text{ – матриця Ван дер Монда;}$$

$$B = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_n \end{bmatrix}.$$

Рішенням системи (4) буде вектор коефіцієнтів полінома C . Через те, що визначник матриці Ван дер Монда завжди відрізняється від нуля, то рішення системи єдине. Для рішення системи (4) необхідно знайти зворотну матрицю A . У цьому випадку рішенням буде $C = A^{-1} \times B$.

Таким чином, через задані на інтервалі $[a, b]$ точки $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$ завжди можна знайти єдиний інтерполяційний поліном $\varphi(x) = P_n(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$, коефіцієнти якого є рішеннями системи (4).

Вираз (1) визначає поведінку функції $\varphi(x)$ тільки у вузлах інтерполяції $(x_i, y_i), i = \overline{0, n}$. Між вузлами $\varphi(x)$ може вести себе довільним чином, скільки завгодно далеко відхиляючись від залежності $f(x)$. Визначити похибку

наближення можна використовуючи вираз для абсолютної похибки $\varepsilon = |f(x) - \varphi(x)|$.

Кращий спосіб перевірити якість інтерполяції – обчислити значення інтерполуючої функції в великому числі точок і побудувати графік. Однак в деяких ситуаціях якість інтерполянта можна проаналізувати. Припустимо, що величина y_i є точні значення відомої функції $f(x)$ в точках x_i . Нехай $P_n(x)$ – єдиний поліном n -го ступеня, що інтерполіує функцію по цим точкам (x_i, y_i) , $i = \overline{0, n}$. Припустимо, що у всіх точках $x \in [a, b]$ функція $f(x)$ має $(n+1)$ безперервну похідну. Тоді можна показати, що абсолютна помилка інтерполяції $\varepsilon(x) = |f(x) - P_n(x)|$ визначається виразом

$$\varepsilon(x) \leq \frac{|(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n)|}{(n+1)!} M_{n+1} \quad (2.63)$$

де $M_{n+1} = \max |f^{(n+1)}(x)|$ – максимальне значення $(n+1)$ -ї похідної функції $f(x)$ на інтервалі $[a, b]$.

Описаний вище математичний апарат включений до додатку CurveFittingTool середовища Matlab, у якому і проводилась апроксимація результатів та розрахунок похибки.

На рисунках 2.20 та 2.21 наведені результати апроксимації сили стиснення та сили при робочому ході поршня.

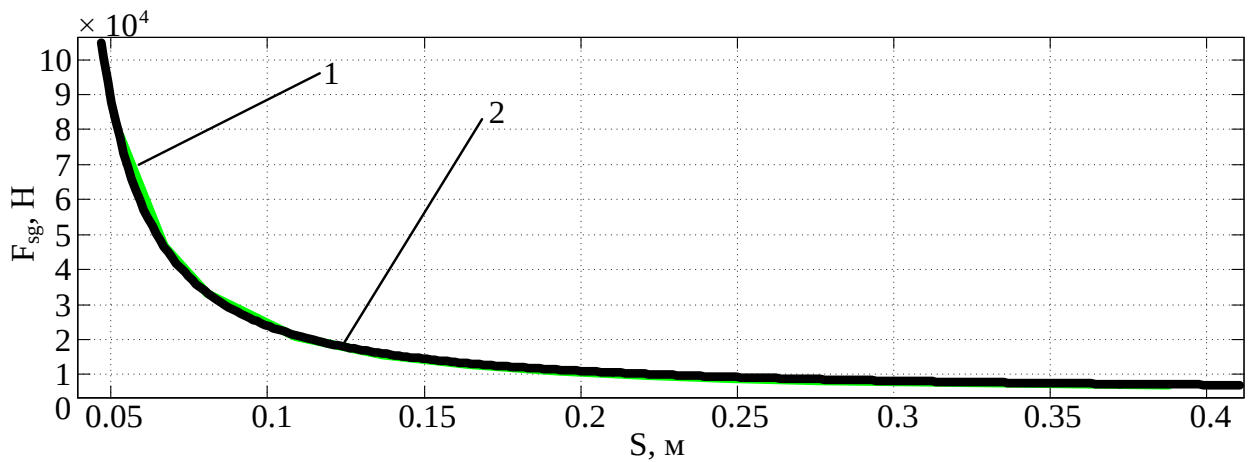


Рисунок 2.20 – Крива зміни сили стиснення: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

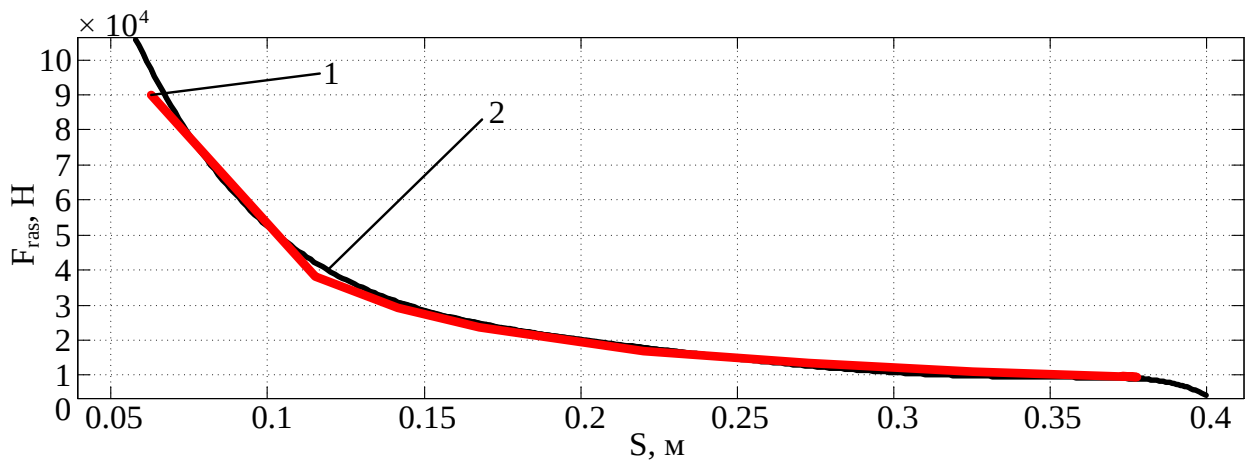


Рисунок 2.21 – Крива зміни сили при робочому ході поршня: 1 – для розрахованих значень; 2 – для значень за поліномом.

Для моделювання дизелю необхідно знати сумарну силу, що реалізується, в залежності від кута повороту колінчастого валу. Поперечні осі кривошипів, що утворені шатунними шийками та щокми, розташовані у трьох площинах під кутом 120° між ними, через це сумарна сила буде дорівнювати сумі сил, що реалізуються кожним поршнем, зі зсувом на кут 120° . Сила, що реалізується поршнем при робочому ході, є позитивною, сила стискання, всмоктування та викиду газів є негативними, тому сумарна сила має форму, що наведена на рисунку 2.22.

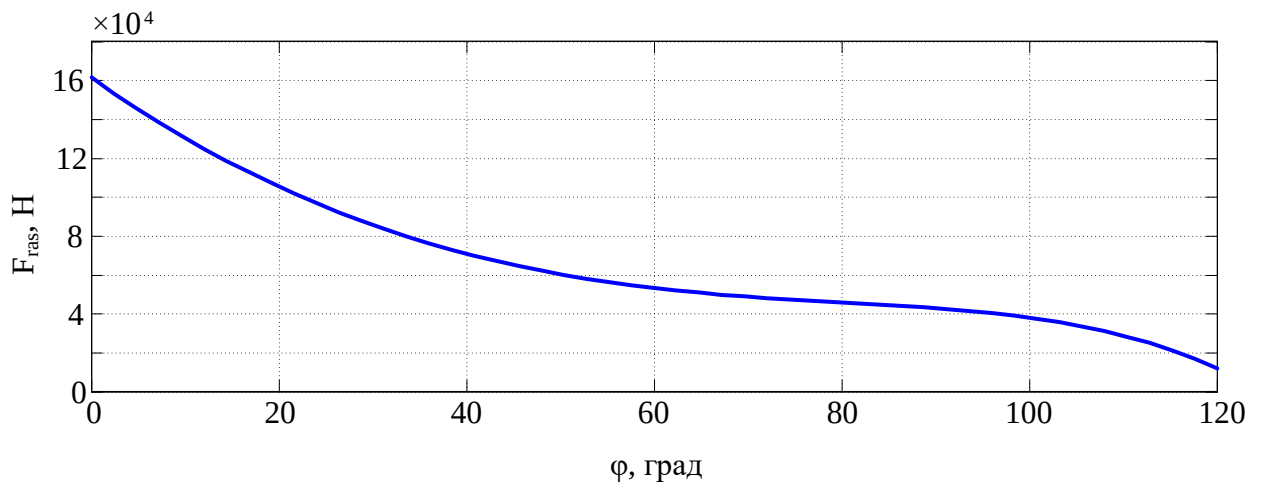


Рисунок 2.22 – Залежність сили, що реалізується дизелем від кута повороту колінчастого валу

2.4.3 Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля

На основі визначеної вище залежності сили дизелю від кута повороту колінчастого валу розроблена імітаційна модель роботи дизелю, що наведена на рисунку 2.23.

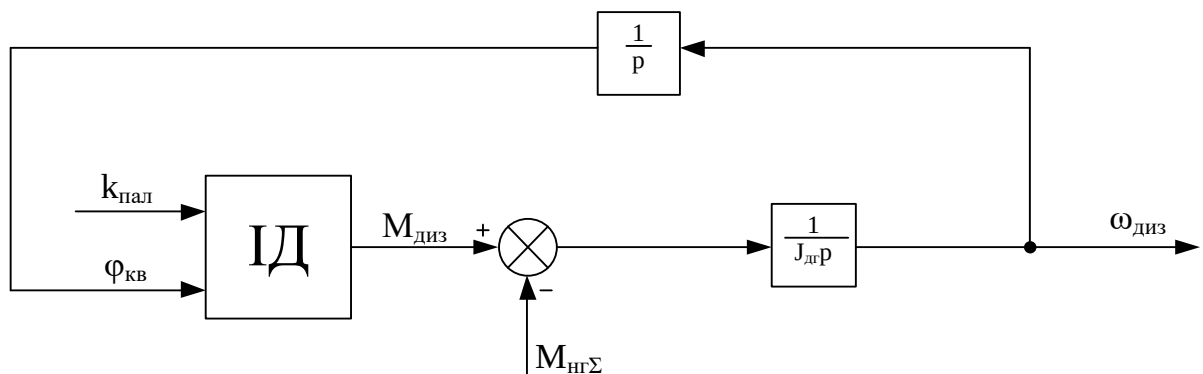


Рисунок 2.23– Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля K6S310DR

Блок ІД, в залежності від кута повороту колінчастого валу та кількості палива, що визначена РКО, визначає силу, яка реалізується дизелем. Отримане значення сили перетворюється у обертовий момент на валу дизеля, що передається до генератору.

2.5 Математичне моделювання руху поїзда

2.5.1 Загальні відомості про рух потяга

Потяг є складною системою, що складається з багатьох частин, пружно і жорстко пов'язаних один з одним. Тому рух поїзда по рейковому шляху можна представити з корисного переміщення уздовж осі шляху, що супроводжується обертанням коліс, осей, якорів тягових двигунів, елементів рушійних механізмів і різних коливальних рухів, що накладаються на нього. Ці коливання з'являються від збурюючих сил з боку шляху і навколишнього середовища, а також унаслідок взаємодії між окремими частинами поїзда. Розглянемо корисний рух і для цього представимо потяг як тверде тіло з масою m зосередженою в його центрі мас[13].

Рівняння руху поїзда можна вивести з виразу для його кінетичної енергії по теоремі Кеніга:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \sum \frac{J_n \omega_n^2}{2} + \sum \frac{J_y \omega_y^2}{2}, \quad (2.64)$$

де A_k – кінетична енергія потяга;

m – маса потяга;

v – швидкість поїзда;

$J_{\partial}, \omega_{\partial}$ – момент інерції і кутова швидкість рушійної колісної пари при застосуванні диференціальної передачі з пов'язаними з ними елементами рушійного механізму;

J_{Π}, W_{Π} — момент інерції і кутова швидкість підтримуючої колісної пари або коліс;

$J_{\text{я}}, W_{\text{я}}$ — момент інерції і кутова швидкість якоря двигуна, включаючи частини передачі, укріплені на його валу.

У формулі (2.64) знаки суми вказують, що підсумовування енергії розповсюджується відповідно на всі колісні пари, колеса і якорі тягових двигунів, які можуть бути різних типів.

При радіусах рушійних і підтримуючих коліс відповідно $R_{\text{д}}$ і $R_{\text{п}}$ та передавальному числі рушійного механізму $\mu = \frac{\omega_{\text{я}}}{\omega_{\text{д}}}$ кутові швидкості руху частин, що обертаються, нехтуючи проковзуванням коліс, приймають:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{v}{R_{\text{д}}} \quad (2.65)$$

$$\omega_{\text{п}} = \frac{v}{R_{\text{п}}} \quad (2.66)$$

$$\omega_{\text{я}} = \mu \omega_{\text{д}} = \frac{\mu v}{R_{\text{д}}} \quad (2.67)$$

Підставивши ці значення кутових швидкостей у вираз (2.41) після винесення за дужки $\frac{mv^2}{2}$ отримуємо:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} \left[1 + \frac{\sum J_{\partial} / R_{\partial}^2 + \sum J_n / R_n^2 + \sum J_{\mu} \mu^2 / R_{\partial}^2}{m} \right] = \frac{mv^2}{2} \left(1 + \frac{m_{\text{э}}}{m} \right) \quad (2.68)$$

Величину, рівну чисельнику другого члена в квадратній дужці, називають еквівалентною масою частин, що обертаються, двочлен

$1 + \frac{m_{\text{э}}}{m} = 1 + \gamma$ – коефіцієнтом інерції частин, що обертаються, а вираз

$(1 + \gamma)m = m_n$ – приведеною масою поїзда.

Таким чином, поїзд з масою m , що має поступальну ходу з одночасним обертанням деяких його частин, еквівалентний тілу з приведеною масою m_n , що здійснює тільки поступальну ходу. Позначимо F_d – рівнодіючу сил, що діють на потяг. Зміна кінетичної енергії поїзда рівна роботі прикладених до нього сил, тому:

$$d \frac{(1 + \gamma)mv^2}{2} = F_d ds \quad (2.69)$$

Звідки:

$$(1 + \gamma)mv \frac{dv}{ds} = F_d \quad (2.70)$$

Для знаходження співвідношення між швидкістю і часом слід підставити в рівняння (2.71) $v = \frac{ds}{dt}$, тоді:

$$(1 + \gamma)m \frac{dv}{dt} = F_d \quad (2.71)$$

Формули (2.47) і (2.48) також можна вивести на підставі другого закону Ньютона, застосувавши його до умов руху поїзда.

У рівняння (2.47) і (2.48) необхідно ввести, наприклад, в праві їх частини, переводні коефіцієнти ξ , оскільки довільно можуть бути вибрані одиниці вимірювань тільки для трьох з чотирьох вхідних в них величин:

$$(1+\gamma)m\frac{dv}{dt}=\xi F_{\partial} \quad (2.72)$$

$$(1+\gamma)mv\frac{dv}{ds}=\xi'F_{\text{д}} \quad (2.73)$$

Рівності (2.49) і (2.50) називають відповідно першою і другою формою рівняння руху поїзда.

Тягові розрахунки зручніше виконувати, користуючись питомими значеннями рівнодіючої сили і її складових, для чого рівняння (2.72) і (2.73) ділять на вагу G поїзда (іноді на масу поїзда m):

$$\frac{dv}{dt}=\frac{\xi}{(1+\gamma)}f_{\partial} \quad (2.74)$$

$$v\frac{dv}{ds}=\frac{\xi'}{(1+\gamma)}f_{\text{д}}, \quad (2.75)$$

де $f_{\partial}=F_{\partial}/G$ – питома значення рівнодіючої сили.

2.5.2 Загальний аналіз основних режимів руху поїзда

Тестування роботи імітаційної моделі проводилось при параметрах, що наведені вище. При цьому основними обмеженнями були час руху, який для перегону Харків–Мерефа не повинен перевищувати 45 хв., а також

максимальна допустима швидкість, яка для вантажних потягів складає 80км/год.

При дослідженні роботи потяга на імітаційній моделі задавались різні рівні обмеження по швидкості. На рисунках 2.24 – 2.26 показані осцилограми роботи маневрового тепловозу з 10 вагонами.

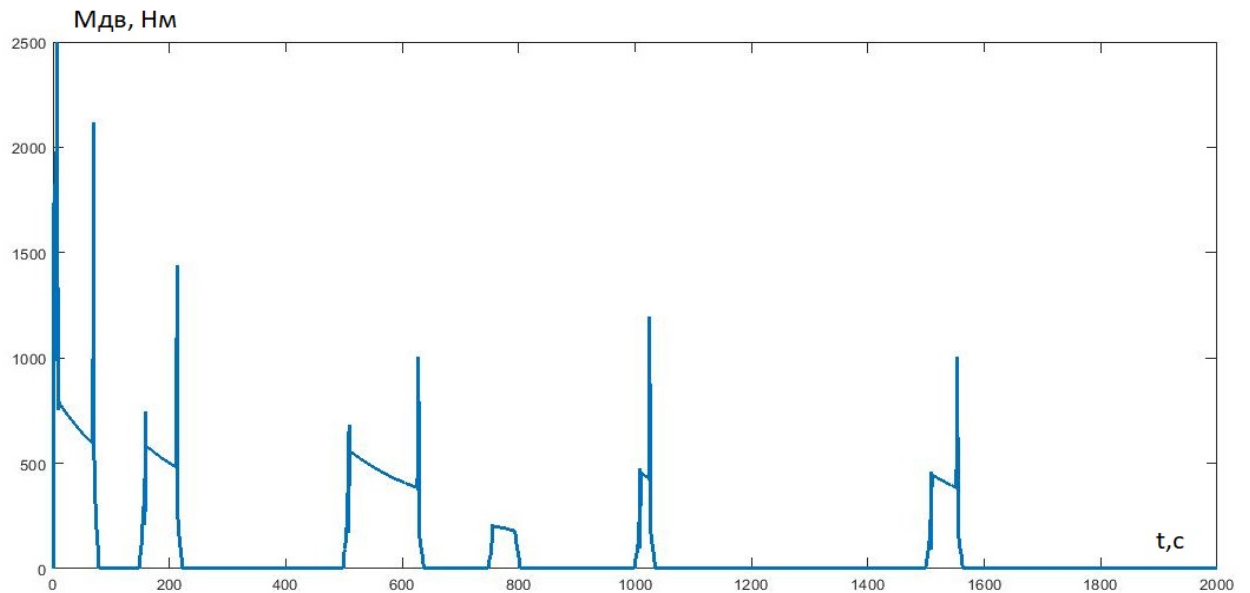


Рисунок 2.24 – Осцилограми моменту двигуна локомотива з поїздом

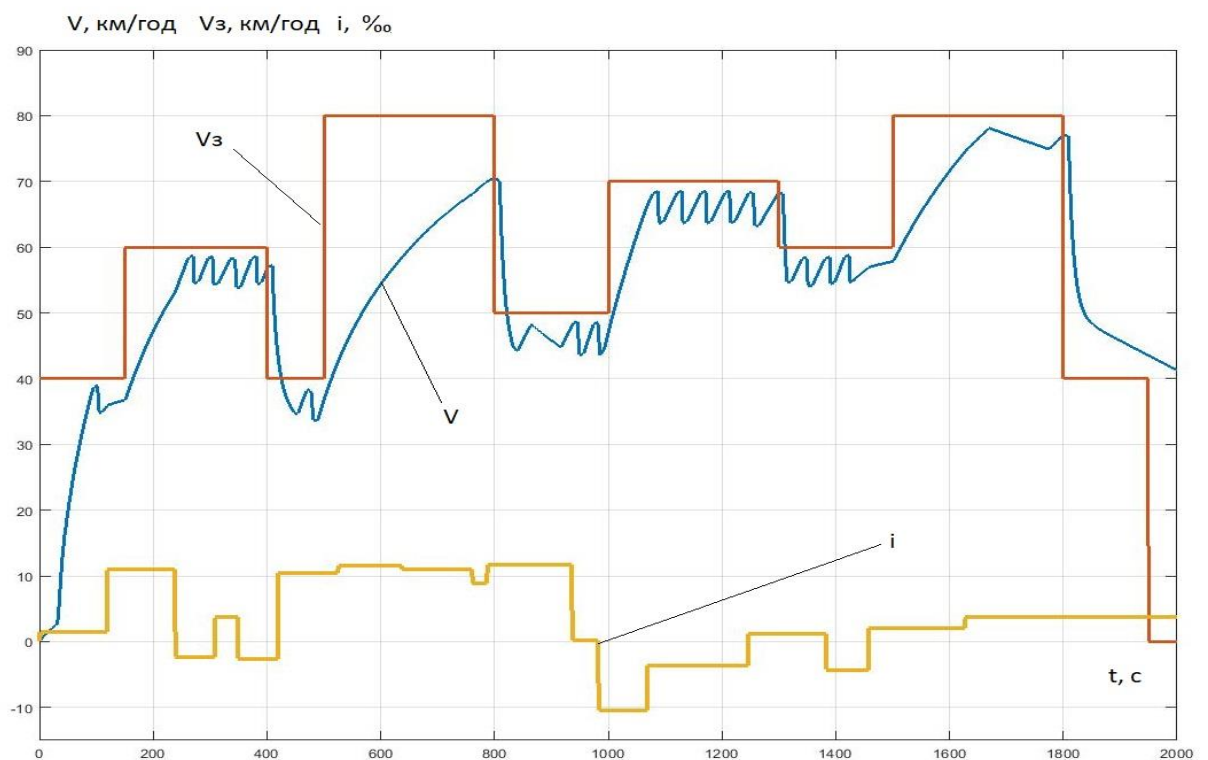


Рисунок 2.25 – Осцилограми швидкості локомотива з поїздом

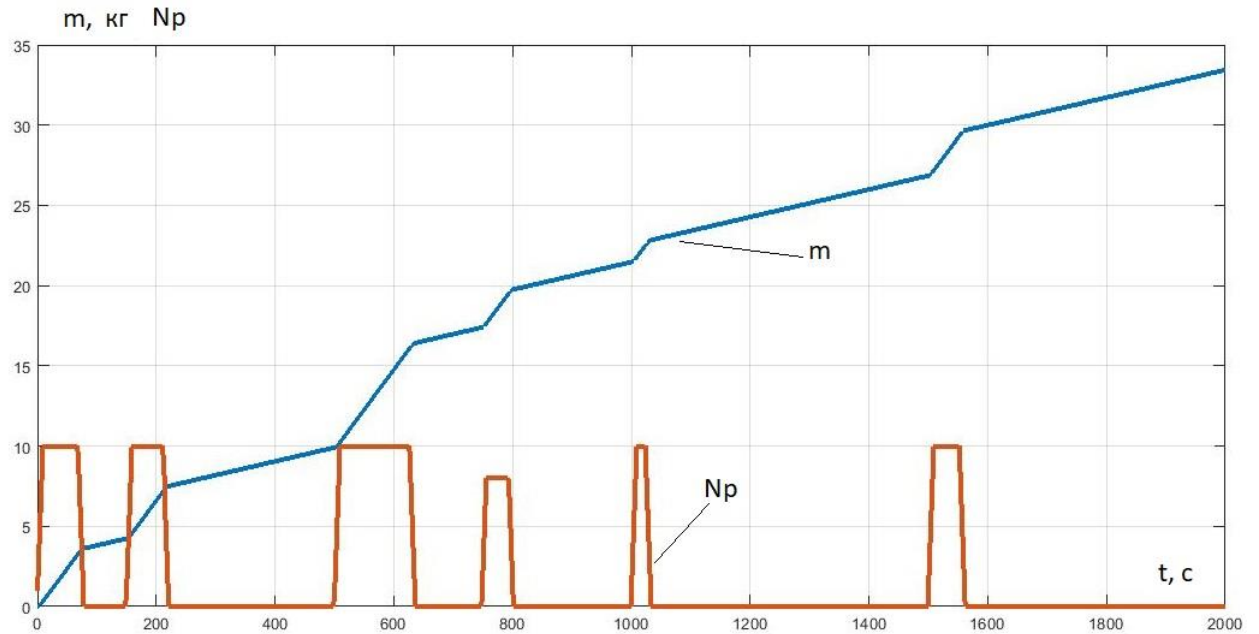


Рисунок 2.26 – Осцилограми розходу палива та робота позицій локомотива з поїздом

На отриманих осцилограмах на рисунку 2.20, кривою N_p показано процес набору позицій, який змінюється при різних величинах швидкості. Кожній позиції відповідає зміна напруги на тягових двигунах та величини струму в них, яка обмежувалась на рівні 600 А. На графіку також просліджується тенденція зростання витрати палива при збільшенні швидкості.

Змінюючи максимальну швидкість в діапазоні 70-95 км/год з кроком 5 км/год були отримані результати, які представлені у вигляді тривимірної поверхні (рис.2.27).

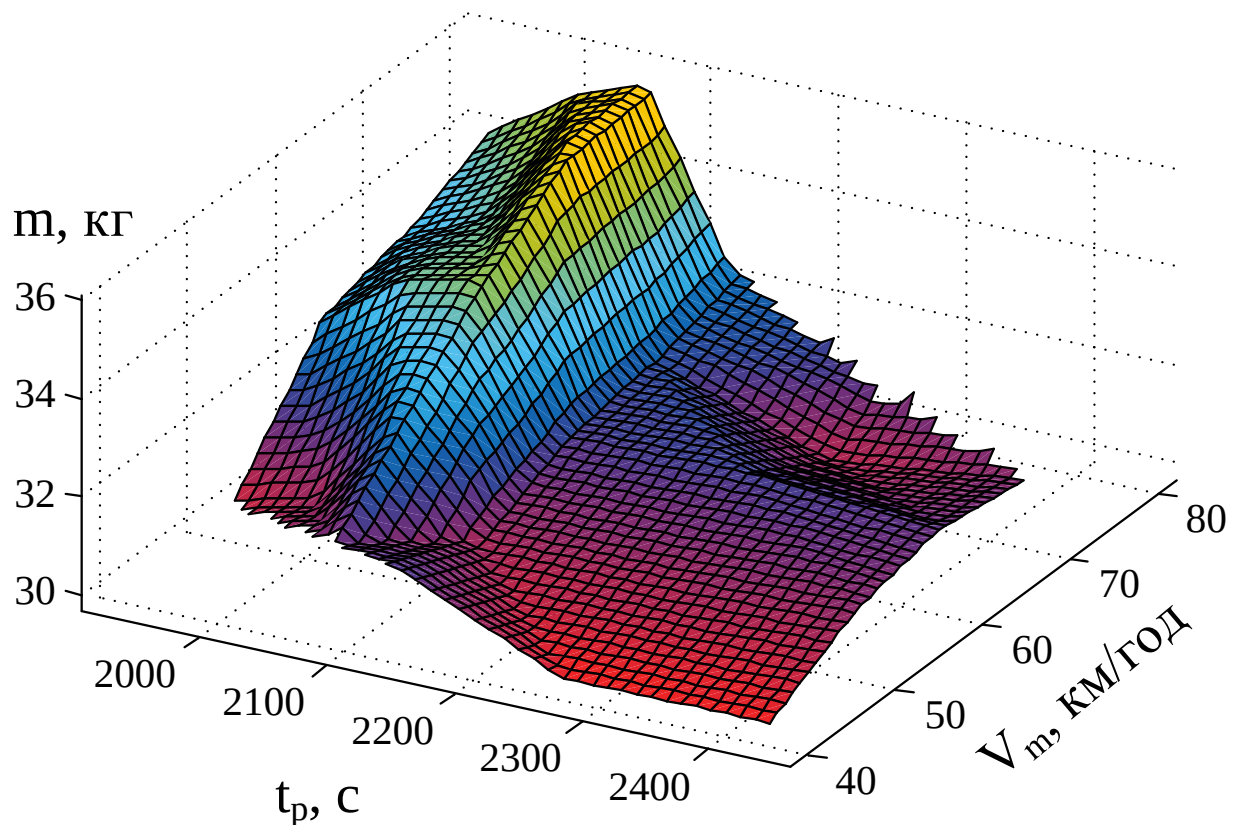


Рисунок 2.27 – Зміна витрат палива в залежності від максимально швидкості

Отримана поверхня підтверджує залежність витрат палива локомотива від режиму ведення потяга машиністом (від часу роботи локомотива на певній позиції та інтенсивності переходу з позиції на позицію) при виконанні однакової роботи, тобто однакового часу руху по перегону. Найменші витрати палива, а саме 29-31 кг мають місце при встановленні максимальної швидкості (рис. 2.27) на рівні 40-50 км/год.

Виробнича діяльність експлуатаційних і ремонтних підприємств ПАТ «Укрзалізниця», промисловості та інших виробничих структур, що використовують рейковий колійне господарство, підтверджує потребу в екологічних локомотивах малої потужності для виконання легких маневрових і господарських робіт[17].

В даний час для таких робіт з складами масою до 1000 т використовуються маневрові тепловози ТЕМ2 і ЧМЕЗ потужністю 1200 - 1350 к.с., а також поїзні магістральні тепловози 2ТЕ10М і 2М62, що призводить до значного зростання експлуатаційних витрат (дизельне паливо, масло, ремонти, обслуговування). Аналіз режимів їх роботи на станційних коліях, господарських роботах в депо і на промислових підприємствах показує, що середня потужність тепловозів за цикл роботи не перевищує 60 - 70 кВт, середня швидкість руху локомотивів 10 - 15 км / год, вагові норми переміщуються складів знаходяться в межах 700 - 1000 т.

Основними вимогами до маневрових локомотивів нового покоління даної потужності є:

- максимальне використання енергії на створення сили тяги, мінімізація енергетичних витрат на допоміжні потреби і витрат на придбання паливно-мастильних матеріалів;
- мінімізація трудових витрат протягом життєвого циклу, включаючи витрати на обслуговування і ремонти всіх видів;
- високі екологічні та ергономічні якості, що задовольняють чинним і перспективним вітчизняним і світовим стандартам.

Практичним рішенням у створенні локомотива, який задовольняє цим вимогам, є використання комбінованої (гібридної) силової установки. Така установка складається з блоку накопичувачів енергії, наприклад, тягової акумуляторної батареї, і дизель-генераторної установки (ДГУ) невеликої потужності. Подібне рішення дозволяє скоротити витрату палива не менше ніж на 40%, так як більша частина маневрової роботи буде здійснюватися на живленні від тягової акумуляторної батареї, і забезпечити високу екологічну чистоту локомотива.

3.1 Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза

Огляд існуючих різновидів систем гібридного тягового приводу локомотивів показав, що в таких системах використовують різноманітні схеми і елементи. Виходячи з аналізу цих систем, пропонується наступна узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу (рисунк 3.1).

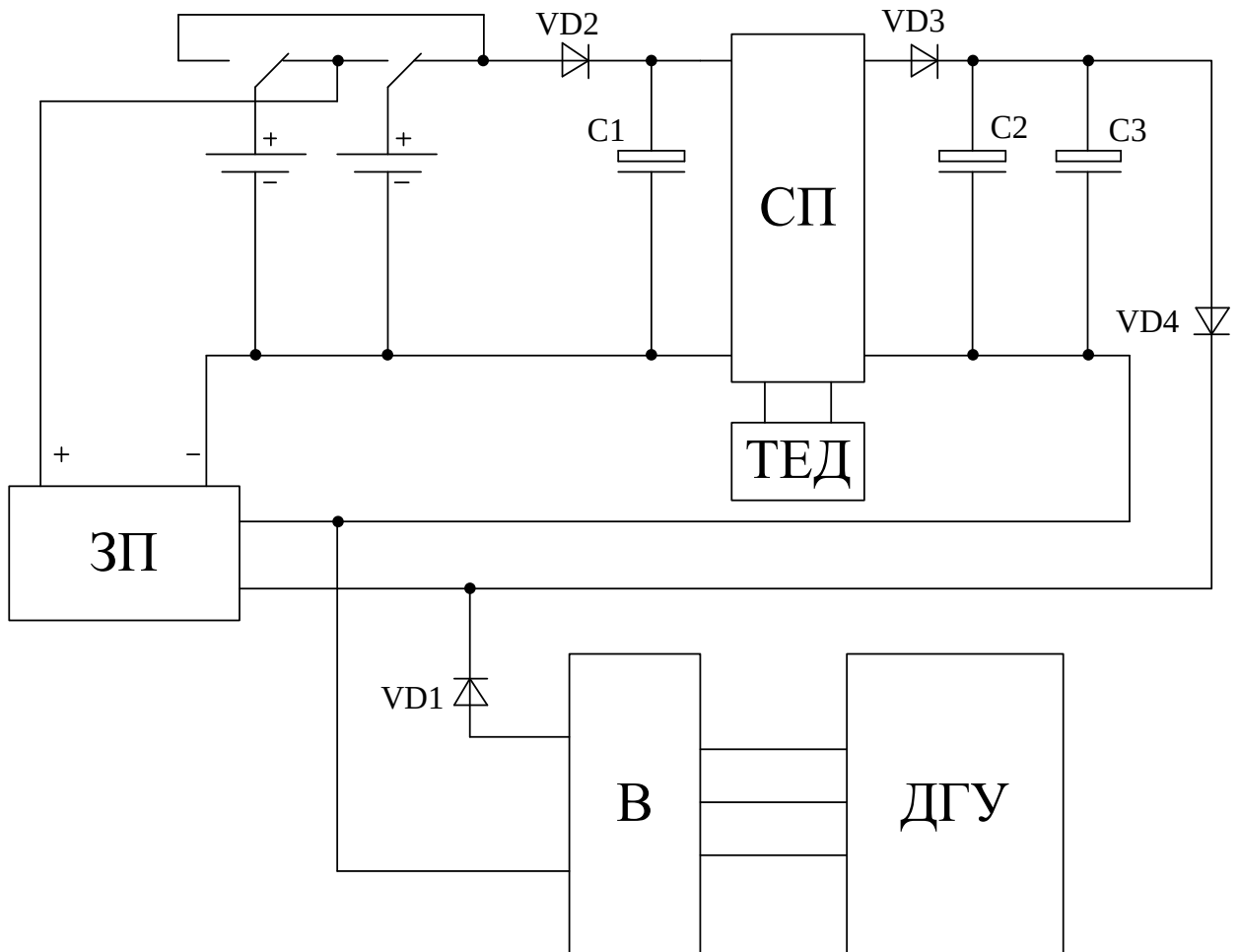


Рисунок 3.1 – Узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу

Запропонована схема складається з дизель-генераторної установки ДГУ, випрямляча В, зарядного пристрою ЗП, статичного перетворювача СП, тягового двигуна ТЕД та двох накопичувачів енергії – акумуляторної та конденсаторної батарей. Дослідження роботи гібридного тепловоза пропонується виконувати з базовими ТЕД постійного струму та більш перспективними на сьогоднішній день – вентильно-індукторними ТЕД.

Для аналізу режимів роботи гібридного тепловозу була складена розгорнута функціональна схема, що наведена на рисунку 3.2.

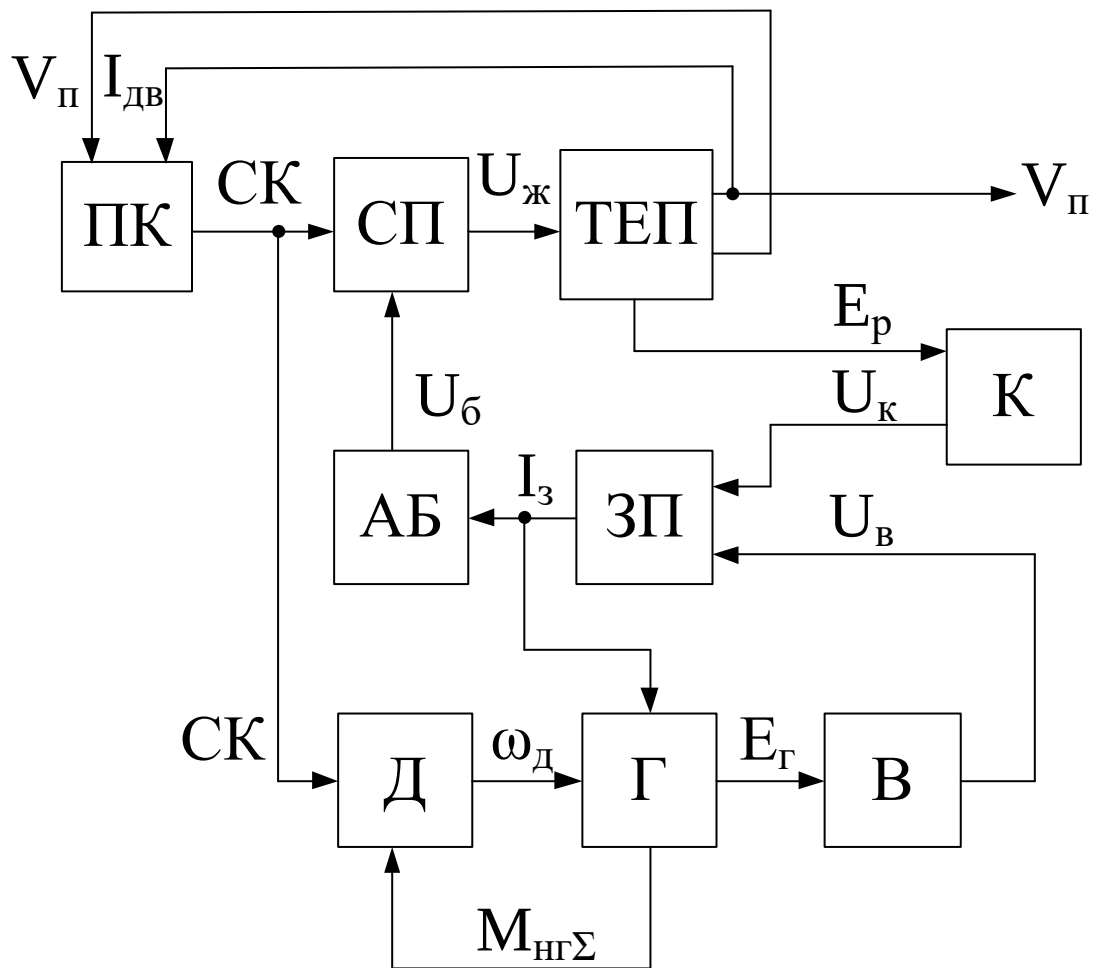


Рисунок 3.2 – Розгорнута функціональна схема гібридного тепловозу

Запропонована схема складається з пульта керування ПК, статичного перетворювача СП, тягового електроприводу ТЕП, конденсаторної батареї К, зарядного пристрою ЗП, акумуляторної батареї АБ, випрямляча В, синхронного генератора Г та дизеля Д. При виконанні умови (3.1), що відповідає алгоритму роботи блоку вибору позиції (рис. 2.3), ПК одночасно подає сигнал на роботу СП та Д.

$$N_p = \begin{cases} N_p - 1 & \text{if } I_m > I_n \vee V_t > V_s \\ N_p & \text{if } I_m < I_n \wedge V_s - 5 \leq V_t \leq V_s, \\ N_p + 1 & \text{if } I_m < I_n \wedge V_t < V_s - 5 \end{cases} \quad (3.1)$$

де N_p – номер позиції ПК;

I_m – величина струму тягового двигуна;

I_n – номінальний пусковий струм двигуна;

V_t – поточна швидкість руху поїзда;

V_s – задана швидкість за тахограмою.

СП живиться від АБ, заряд якої відбувається через ЗП, який, в свою чергу, може отримувати живлення як від К, так і від Г через В. К заряджається при режимі рекуперативного гальмування та віддає свою енергію при досягненні певного рівня напруги, що відповідає номінальному значенню для роботи ЗП. При низькому рівні напруги на К та розрядженій АБ її живлення здійснюється від Д-Г. В якості ТЕП може виступати як привід постійного, так і змінного струмів.

Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда V_n та струм двигуна $I_{\partial\partial}$, від величин яких залежить сигнал керування CK , який є вхідною величиною для Д і СП. В залежності від CK (тобто номера позиції контролера машиніста) СП визначає рівень напруги живлення ТЕП $U_{жс}$. СП, в свою чергу, отримує вхідну величину напруги U_{∂} від АБ. ТЕП може працювати як в тяговому режимі, так і в режимі рекуперації. Вихідними величинами блока ТЕП є швидкість поїзда V_n , струм двигуна $I_{\partial\partial}$ (в тяговому режимі) та Е.Р.С. E_p (в режимі рекуперації). В залежності від величин напруг U_k та U_{∂} ЗП видає величину струму заряду I_z , який поступає в АБ та Г. Вхідними величинами блоку Г є значення швидкості дизеля $\omega_{\partial u z}$ та струму I_z , а вихідними – Е.Р.С. генератора E_{∂} та моменту навантаження $M_{n2\Sigma}$, яке є вхідною величиною для Д.

3.2 Математичне моделювання системи Г-Д.

Проаналізувавши діаграму (рис. 1.18) було встановлено, що час використання локомотива на номінальну потужність складає 29% від загального добового часу експлуатації. Виконавши відповідні розрахунки, було визначено кількість енергії, що витрачається за добу експлуатації локомотива, яка складає 3,48 МВт·год. Виходячи з цього, сумарна добова кількість енергії, що виробляється дизель-генераторною установкою, повинна перевищувати загальнодобову затрачену кількість енергії. А тому в запропонованій системі (рис. 3.1) в якості прототипу застосований новий дизель виробництва фірми Caterpillar C18 ACERT, що зображений на рисунку 3.3, а його технічні характеристики приведені в таблиці 3.1.

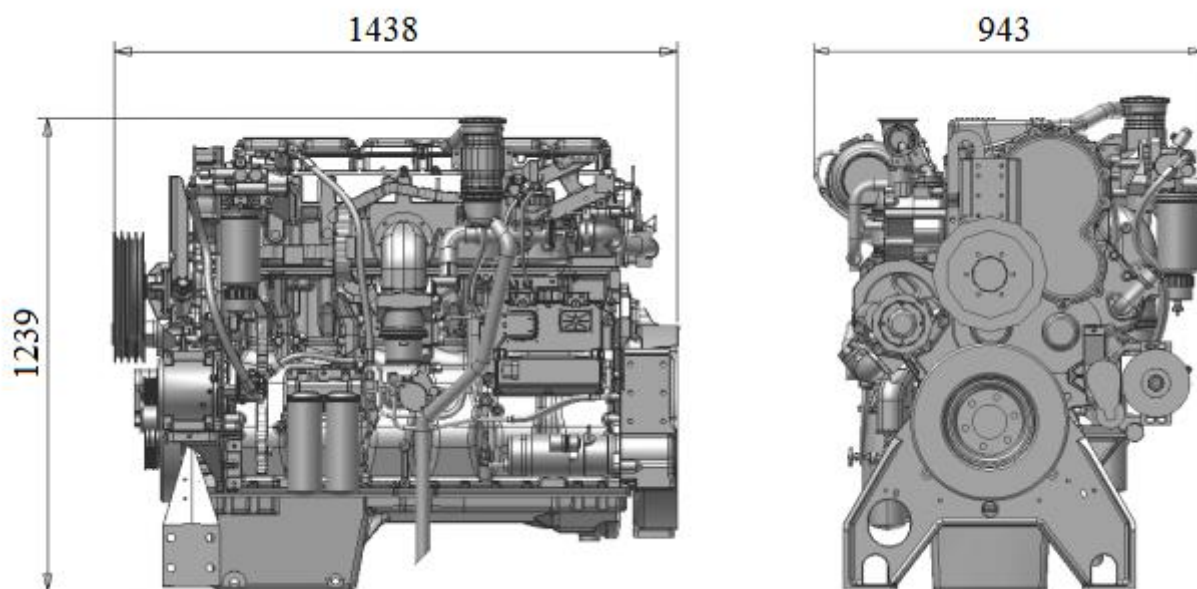


Рисунок 3.3 – Дизель C18 ACERT

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики дизеля C18 ACERT

Параметр	Значення
Максимальна потужність, кВт	597
Мінімальна потужність, кВт	429

Номінальна частота обертання, об/хв	1800-2100
Конфігурація двигуна	6-циліндровий, 4-тактний
Маса, кг	1673

Двигуни C18 ACERT потужністю 429-522 кВт (575-700 л.с.) при частоті обертання 1800-2100 об/хв. відповідають вимогам стандартів на викид забруднюючих речовин Stage II Китаю, EPA Tier 3 та ЄС Stage IIIA або еквівалентних їм.

Діаграма роботи дизеля C18 ACERT наведена на рисунку 3.4.

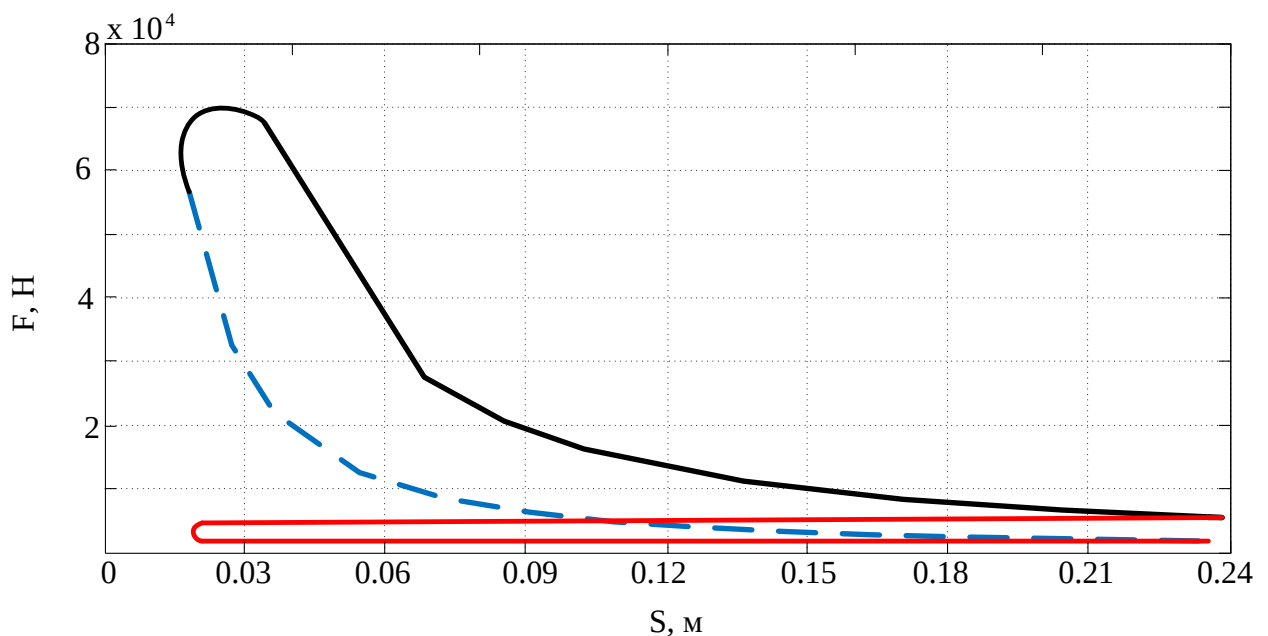


Рисунок 3.4 – Діаграма роботи дизеля C18 ACERT

Імітаційне моделювання дизеля виконувалось за методикою, що приведена в розділі 2.

Відповідно потужності запропонованого дизеля обрано синхронний генератор з постійними магнітами марки ГС-200-400. Його загальний вид представлений на рисунку 3.5, а технічні характеристики зведені в таблицю 2.



Рисунок 3.5 – Генератор ГС-200-400

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики дизеля ГС-200-400

Параметр	Значення
Потужність, кВт	200
Напруга, В	400
Номінальний струм, А	900
Кількість фаз	3
З'єднання фаз	зірка
Частота обертання, об/хв.	2000
Маса, кг	1600

Імітаційне моделювання генератора виконано за допомогою блоку SynchronousMachinepuStandart з розділу SimPowerSystems програмного комплексу Matlab.

3.3 Імітаційне моделювання накопичувачів енергії

Для забезпечення безперервної роботи тепловоза сумарна добова кількість енергії, яку повинен віддавати накопичувач енергії становити не менше 30% від загальних добових витрат енергії. З огляду на це в якості прототипів накопичувачів енергії на тепловозі застосовані акумулятор LT-LYP 770 (рисунок 3.6) та іоністор ИКЭ 40/96 (рисунок 3.7), технічні характеристики яких приведені у таблицях 3.3 та 3.4 відповідно.



Рисунок 3.6 - Акумулятор LT-LYP 770

Таблиця 3.3 – Основні технічні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Параметр	Значення
Номінальна ємність, А·год.	770
Номінальна напруга, В	3,2
Питома енергія по масі, Вт.год/кг	105
Ресурс при глибині розрядки 80%, циклів	3000
Саморозряд при зберіганні, % в місяць	< 3
Робота при температурі, °С	від -40 до +50
Маса, кг	9,95

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики ИКЭ 40/96

Параметр	Значення
----------	----------

Напруга, В	110
Ємність, Ф	8,5
Вага, кг	34
Довжина, мм	400
Робота при температурі, °С	від -45 до +50



Рисунок 3.7 – Іоністорна батарея ИКЭ 40/96

Оскільки номінальна напруга акумулятора LT-LYP 770 складає 3,2 В, то для живлення ТЕД необхідно 65 послідовно з'єднаних акумуляторів з загальною напругою 198В. Паралельне з'єднання накопичувачів дозволяє отримати великі пускові струми, а також уникнути просадок за струмом при збільшенні навантажень на накопичувач. З метою підтримання номінального струму двигунів пропонується використовувати 3 паралельні гілки.

Іоністорна батарея повинна, з одного боку, забезпечувати можливість накопичення енергії під час рекуперативного гальмування, а з іншого – підтримувати вихідну напругу в діапазоні, що відповідає номінальному рівню для роботи зарядного пристрою.

Як відомо, робота акумуляторної батареї відбувається за зарядно-розрядною характеристикою. Для обраного акумулятора розрядна та зарядна характеристики представлені на рис. 3.8 та рис. 3.9 відповідно.

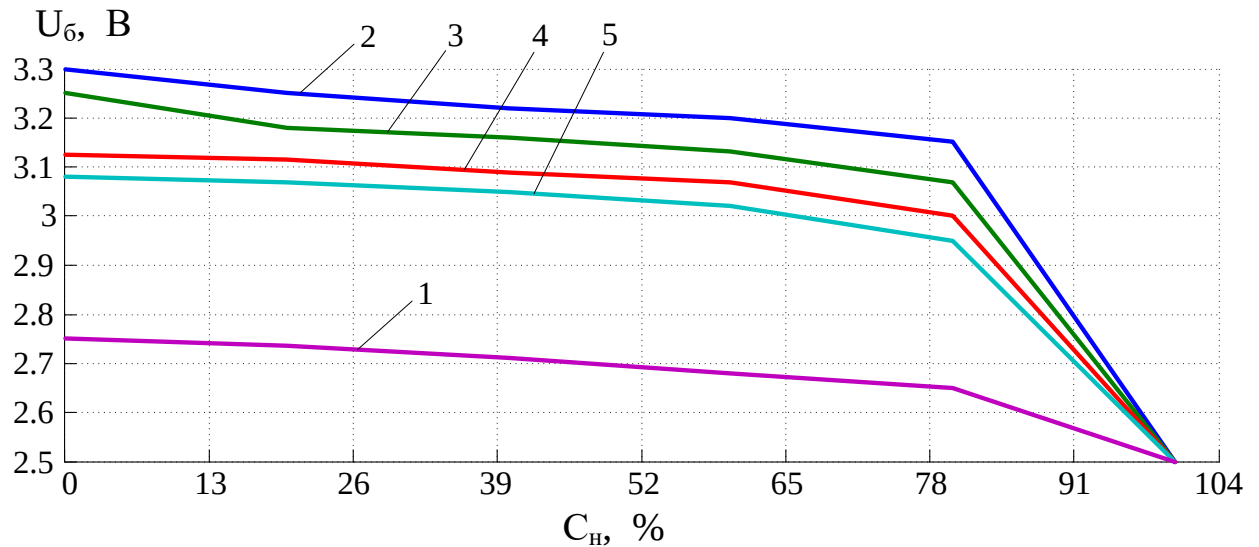


Рисунок 3.8 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

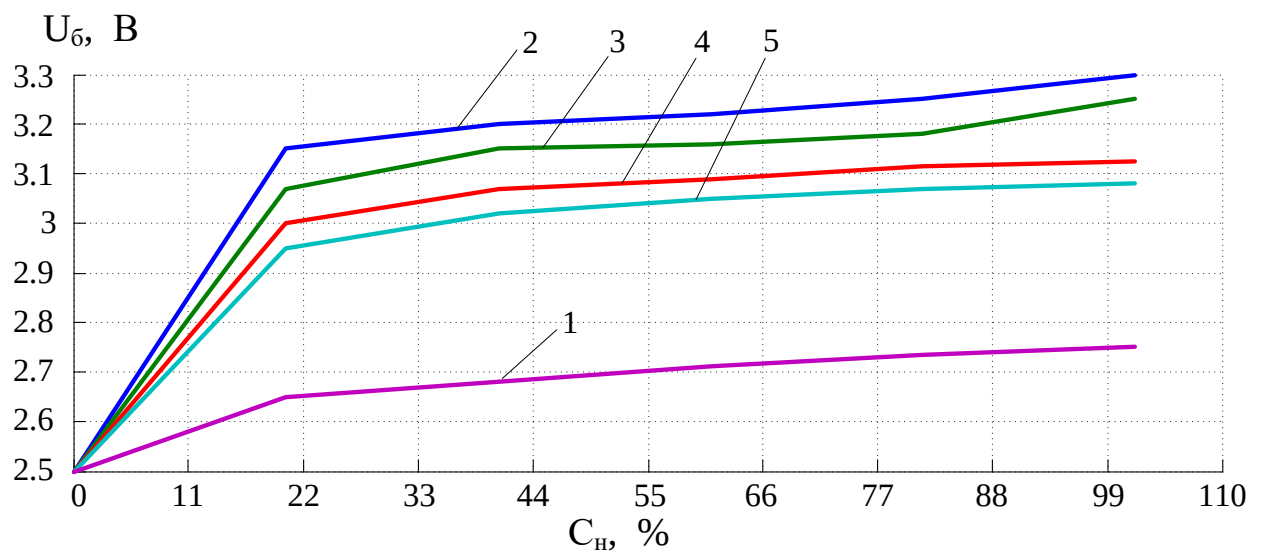


Рисунок 3.9 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Значення сили струму C обраного акумулятора складає 770 А. Функціональна схема накопичувача енергії LT-LYP 770 представлена на рис. 3.10.

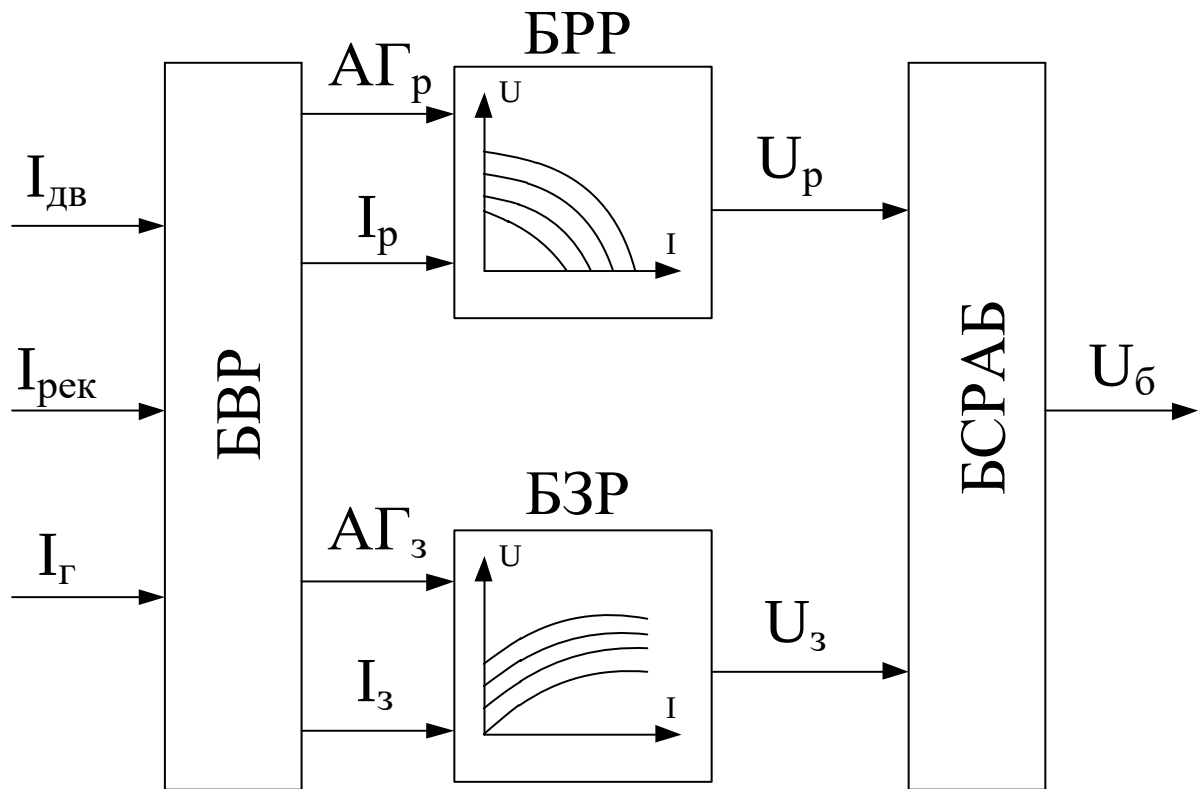


Рисунок 3.10 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

Дана функціональна схема включає в себе чотири основних блока: БВР, БРР, БЗР та БСРАБ. На вхід БВР подаються три величини струмів: струм двигуна у тяговому режимі $I_{\text{дв}}$, струм двигуна у режимі рекуперації $I_{\text{рек}}$ та зарядний струм від синхронного генератора $I_{\text{Г}}$. В залежності від їх значень БВР вибирає зарядний або розрядний режим роботи АБ. БРР та БЗР відпрацьовують задані характеристики (рис. 3.8 і 3.9) та видають сигнали $U_з$ і U_p , які відповідають певному рівню напруги АБ, що, в свою чергу, залежать від амперер-годин її роботи у режимі заряду $АГ_з$ та розряду $АГ_p$, а також від величини розрядного I_p і зарядного $I_з$ струмів. БСРАБ узгоджує між собою два вхідних сигнали $U_з$ і U_p та видає результуюче значення напруги $U_б$ АБ.

Моделювання іоністора виконувалося на основі наступних рівнянь:

- напруга заряду конденсатора

$$U_z = E_p \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.2)$$

де E_p – Е.Р.С. двигуна в режимі рекуперації;

t – час заряду конденсатора;

τ – стала часу.

- зарядний струм

$$I_z = \frac{E_p}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.3)$$

де R_v – опір зарядного контуру.

- напруга розряду конденсатора

$$U_p = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.4)$$

де U_0 – початковий розрядний рівень напруги.

- розрядний струм

$$I_p = \frac{U_0}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3.5)$$

Функціональна схема, що відображає роботу конденсатора наведена на рисунку 3.11.

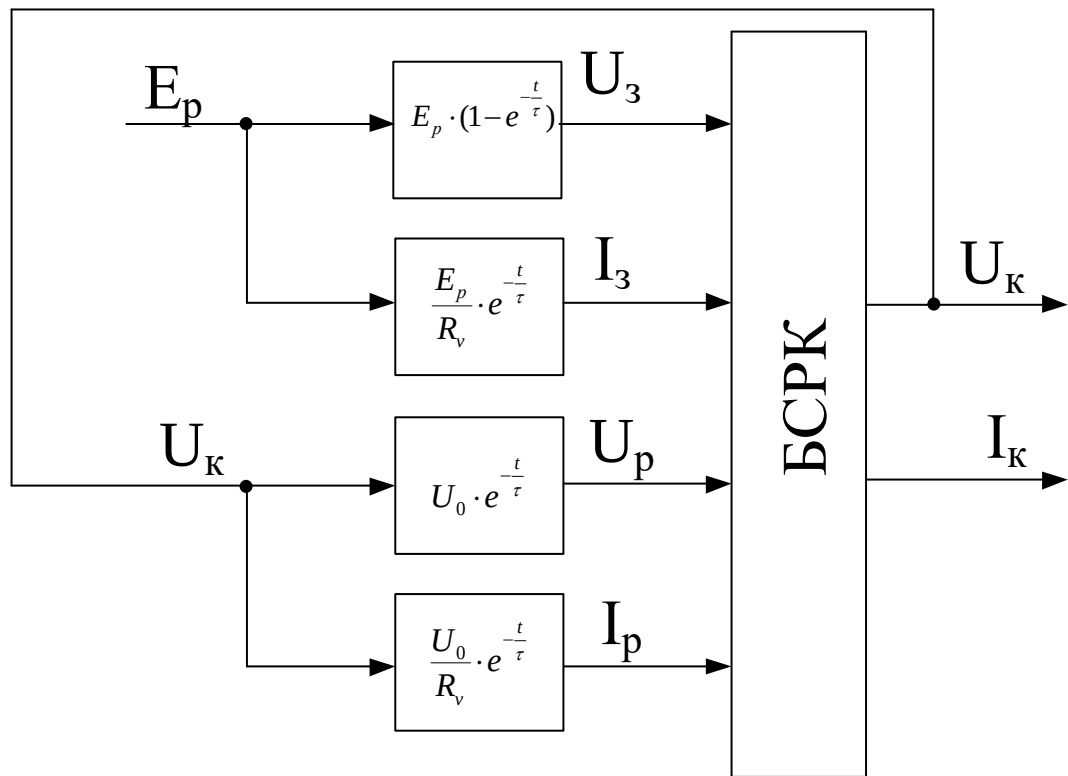


Рисунок 3.11 – Функціональна схема моделі іоністора

Використовуючи рівняння (3.2) та (3.4) були отримані значення напруг U_3 і U_p та струмів I_3 і I_p , які є входніми величинами для БСРК. БСРК, в свою чергу, узгоджує між собою ці сигнали та видає результуюче значення напруги U_K та струму I_K конденсатора.

При рішенні практичних задач управління методом теорії простору станів ми часто зустрічаємось з випадком, коли частина змінних стану не можуть бути вимірюваними.

Якщо одна, чи декілька змінних стану не можуть бути вимірюваними, то для їхньої ідентифікації можна використовувати спостерігачі стану. Задачі, у яких не можуть бути вимірюваними усі компоненти стану, відносяться до задач керування, або компенсації збурень при неповній інформації про об'єкт регулювання.

Важливою складовою частиною синтезу системи зі спостерігачем стану, й особливо системи модального керування, є вибір бажаного характеристичного полінома. Звичайно, за бажані приймаються так звані стандартні поліноми, синтезовані за деякими правилами або критеріями.

При комбінованому керуванні з'являється можливість забезпечити бажане розташування не тільки полюсів, але і нулів системи[26].

Далі ми розглянемо метод синтезу спостерігача стану в модальному керуванні.

Структурна схема асинхронного електропривода наведена на рисунку 4.1.

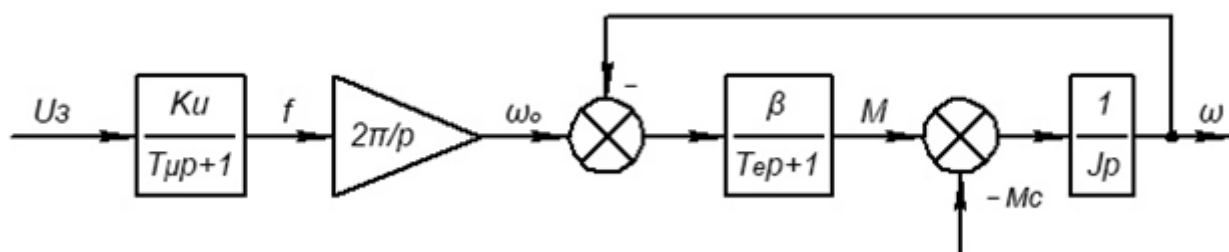


Рисунок 4.1 – Структурна схема асинхронного електроприводу

$$\begin{cases} T_{\mu} \frac{df}{dt} + f = K_u \cdot U_3 \\ T_e \frac{dM}{dt} + M = \left(\frac{2\pi}{p} - \omega \right) \beta, \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \end{cases} \quad (4.1)$$

де T_{μ} – постійна часу інвертора;

T_e – електромагнітна постійна часу двигуна;

K_u – коефіцієнт підсилення інвертора;

β – модуль жорсткості характеристики АД;

M – момент на валу двигуна;

p – кількість пар полюсів АД;

ω – швидкість обертання двигуна;

J – момент інерції;

U_z – напруга завдання;

f – частота живлячої напруги.

Сукупність зворотних зв'язків, число яких може бути більше двох, у схемі із загальним підсилювачем утворить так званий модальний регулятор, а змінні при цьому звуться змінними стану електропривода. Основним завданням модального регулятора є забезпечення заданої якості динамічних процесів електропривода – швидкодії, стійкості й ступеню загасання перехідних процесів. Це досягається вибором видів і відповідним розрахунком коефіцієнтів зворотних зв'язків по змінним електропривода. Структура схема електропривода з модальним регулятором наведена на рисунку 4.2.

Для синтезу коефіцієнтів модального регулятора визначаємо вектор стану X , та вектор завдання U .

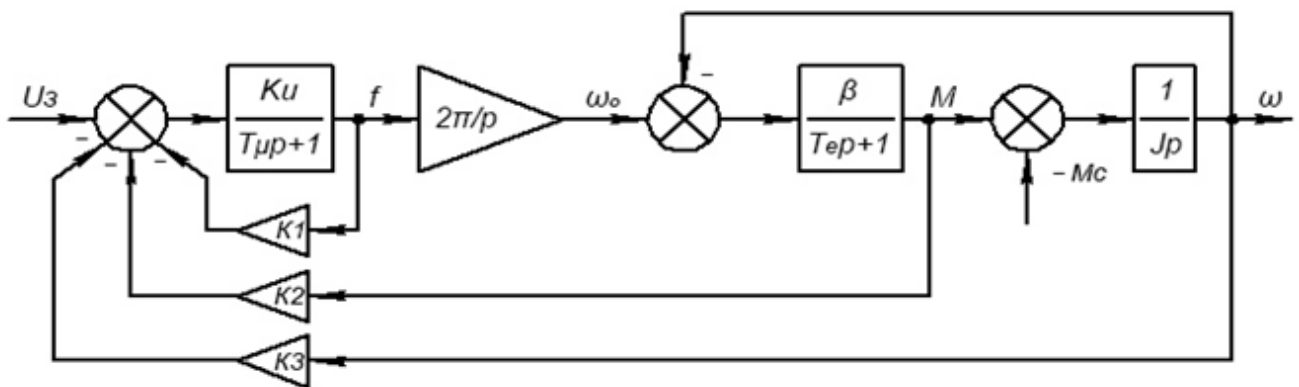


Рисунок 4.2 – Структурна схема асинхронного електропривода з модальним регулятором

$$X = [f M \omega]^T. \quad (4.2)$$

$$U = [U_3]. \quad (4.3)$$

Для визначення матриць переходу А, керування В, виходу С, без інерційних зв'язків Дперетвориморівняння 6.1.

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{1}{T_\mu} f + 0 \cdot M + 0 \cdot \omega + \frac{1}{T_\mu} U_3 \\ \frac{dM}{dt} = \frac{2\pi}{p} \cdot \frac{\beta}{T_e} \cdot f - \frac{1}{T_e} \cdot M - \frac{\beta}{T_e} \cdot \omega + 0 \cdot U_3 ; \\ J \frac{d\omega}{dt} = 0 - f + \frac{1}{J} \cdot M + Q \cdot \omega + 0 \cdot U_3 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (4.5)$$

Виходячи з умов модального керування описаного рівнянням 4.5 визначаємо матриці переходу та керування.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\mu} & 0 & 0 \\ \frac{2\pi}{p} \cdot \frac{\beta}{T_e} & -\frac{1}{T_e} & -\frac{\beta}{T_e} \\ 0 & \frac{1}{J} & 0 \end{bmatrix}; \quad (4.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\mu} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Так як у електроприводі неможливі без інерційні зв'язки, то матриця D завжди дорівнює 0.

Коефіцієнти зворотних зв'язків модального регулятора розраховуються з рівнянь, отриманих прирівнюванням коефіцієнтів при однакових ступенях характеристичного полінома регулятора й бажаного полінома фільтра Баттерворта.

Передавальна функція фільтру Баттерворта третього порядку має вигляд

$$W(p) = \frac{1}{1p^3 + 2p^2 + 2p + 1}. \quad (4.8)$$

Середньгеометричний корінь рівняння λ_0 фільтру Баттерворта дорівнює 1 рад/с. Для забезпечення потрібної швидкодії системи регулювання значення λ_0 повинно знаходитися у межах 100-300 рад/с.

Передавальна функція фільтру Баттерворта з урахуванням швидкодії системи керування має вигляд.

$$W(p) = \frac{1}{1 \cdot \lambda_0^0 \cdot p^3 + 2 \cdot \lambda_0^1 \cdot p^2 + 2 \cdot \lambda_0^2 \cdot p + 1 \cdot \lambda_0^3}. \quad (4.9)$$

Матриця бажаного розміщення полюсів має вигляд

$$P = [1 \cdot \lambda_0^0 \quad 2 \cdot \lambda_0^1 \quad 2 \cdot \lambda_0^2 \quad 1 \cdot \lambda_0^3]. \quad (4.10)$$

Виходячи з умов рівняння 6.11 визначаємо матрицю коефіцієнтів K модального регулятора.

$$P = A - BK. \quad (4.11)$$

Синтез матриці коефіцієнтів спостерігача станів L (рисунк 6.4), які забезпечують адекватну роботу регулятора проводиться за тією ж методикою що і синтез модального регулятора за умовами

$$\lambda_{0M} = (2 \div 4)\lambda_{0c}, \quad (4.12)$$

де λ_{0M} – середньгеометричний корінь рівняння фільтру Баттерворта в модальному регуляторі;

λ_{0c} – середньгеометричний корінь рівняння фільтру Баттерворта в спостерігачі стану.

Перевірку методу синтезу модального регулятора з наближенням стану проводимо за допомогою модулю Simulink програми MATLAB 12. Імітаційна модель даної системи та результати моделювання з дефрагментаціями наведені на рисунках 4.3 – 4.7.

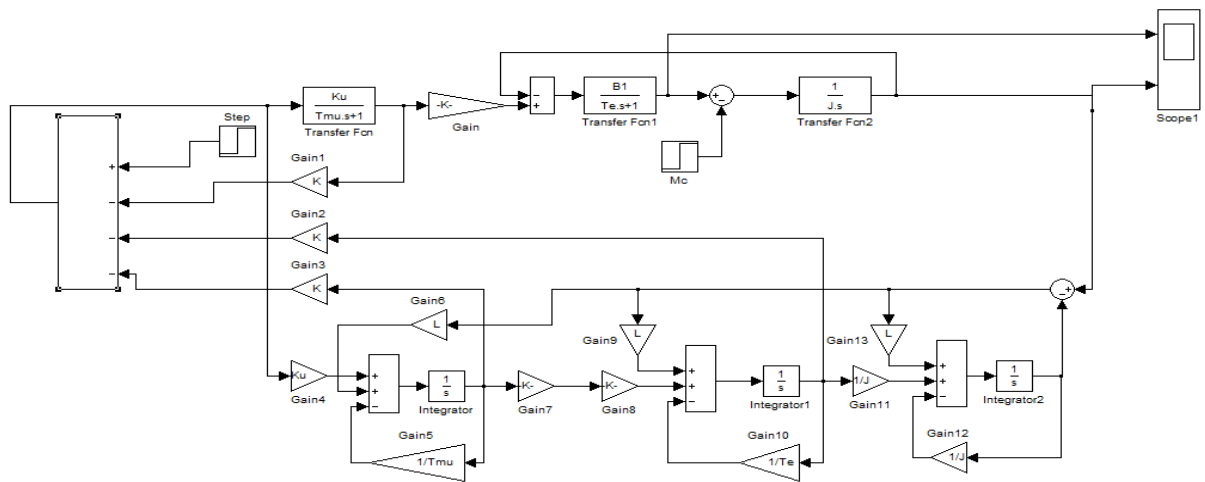


Рисунок 4.3 – Імітаційна модель модального регулятора зі спостерігачем стану

При дослідженні роботи гібридного тепловозу з АП була використана імітаційна модель, що розглянута вище, за винятком застосування в якості приводного нового типу двигуна, а саме АД.

На основі загальної функціональної схеми та функціональних схем окремих блоків в середовищі Matlab було складено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза, де був застосований тяговий двигун постійного струму з широтно-імпульсною системою керування. Модель руху поїзда розроблена на основі структурної схеми з використанням профілю, що відповідає ділянці шляху Харків-Мерефа. У запропонованій моделі була врахована можливість переходу тягових двигунів у генераторний (рекуперативний) режим з метою накопичення енергії на іоністорах. Рекуперативне гальмування використовувалось до швидкості 10 км/год, з подальшим догальмовуванням пневматичним гальмом.

При дослідженні роботи гібридного тепловозу на імітаційній моделі задавались тахограма обмеження швидкості. На рисунках 3.12 – 3.16 показані осцилограми роботи гібридного тепловоза з 10 вагонами на профілі шляху, що зображений кривою і.

Для підтримання поточної швидкості по заданій тахограмі (крива 1) машиністом проводилась зміна напруги на тягових двигунах шляхом зміни позиції контролера машиніста. Зміна однієї позиції відповідає зміні рівня вихідної напруги широтно-імпульсного перетворювача на 10%. В тяговому режимі струм обмежувався на рівні 600А. Від'ємні значення струму на кривій відповідають режиму рекуперації та заряду акумуляторної батареї. При досягненні напругою іоністора значення 300 В відбувався процес заряду АБ, величини напруги якої показане кривою на рисунку 3.14. На рисунку 3.15 крива показує розход палива при русі потяга. При використанні гібридної системи розход палива зменшився з 33 кг до 19 кг, тобто на 40%, що відповідає доцільності використання таких систем.

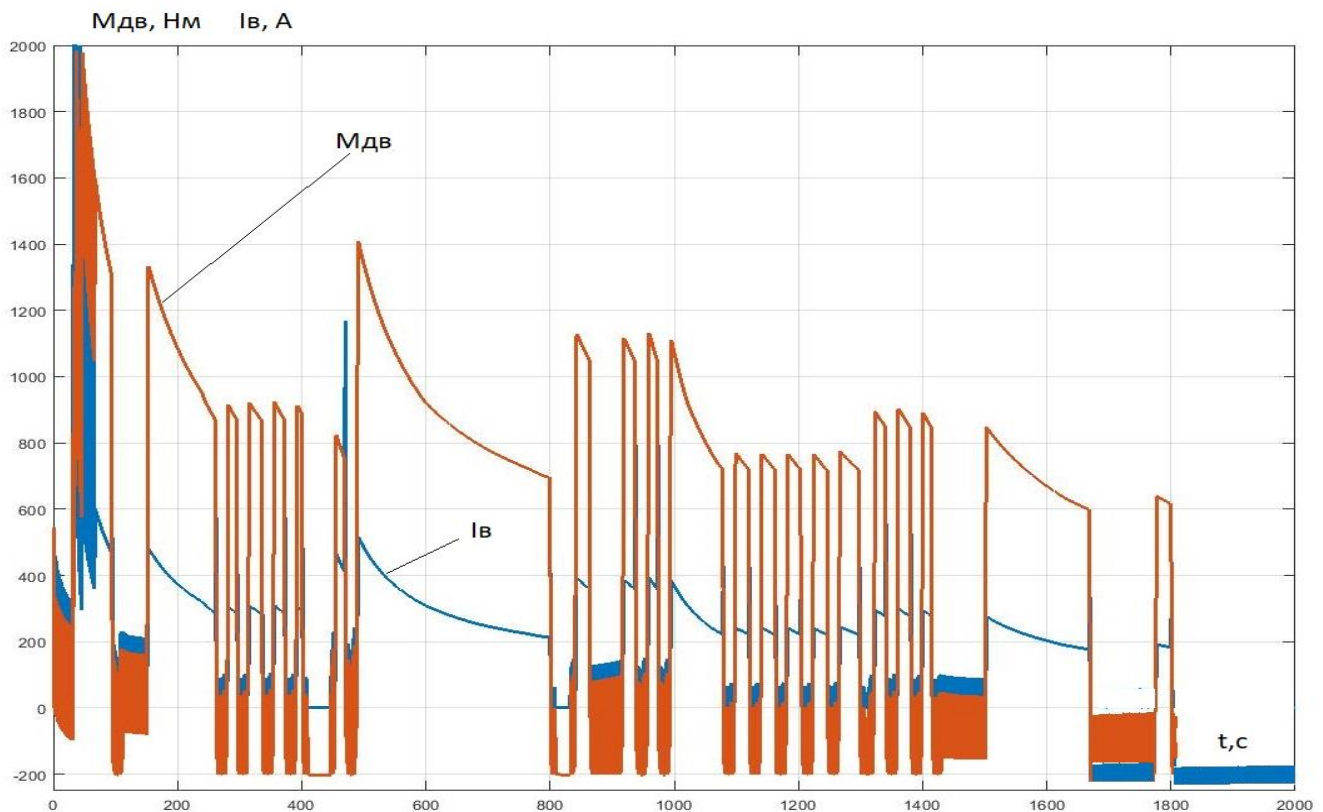


Рисунок 4.4 – Осцилограми моменту тягового двигуна та струму акумуляторної батареї при роботі гібридного локомотива

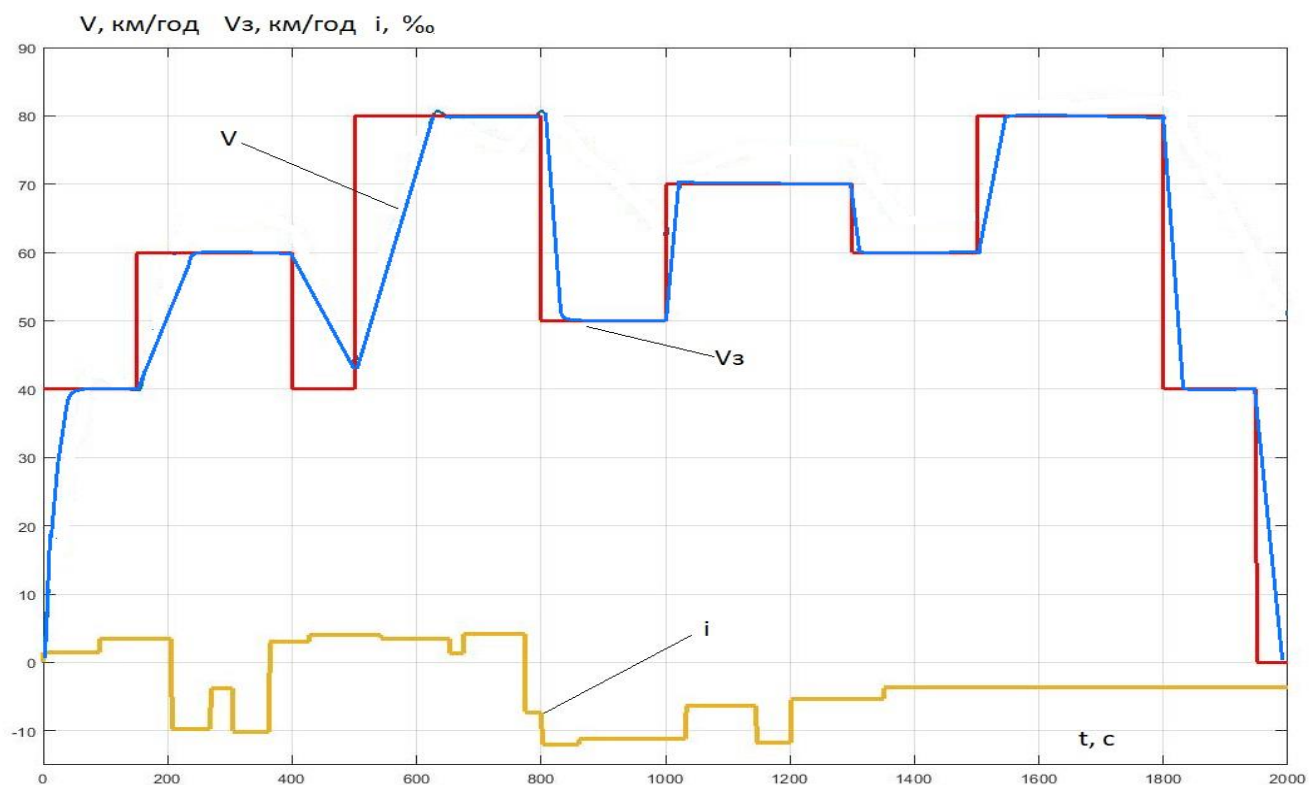


Рисунок 4.5 – Осцилограми швидкості гібридного локомотива з поїздом

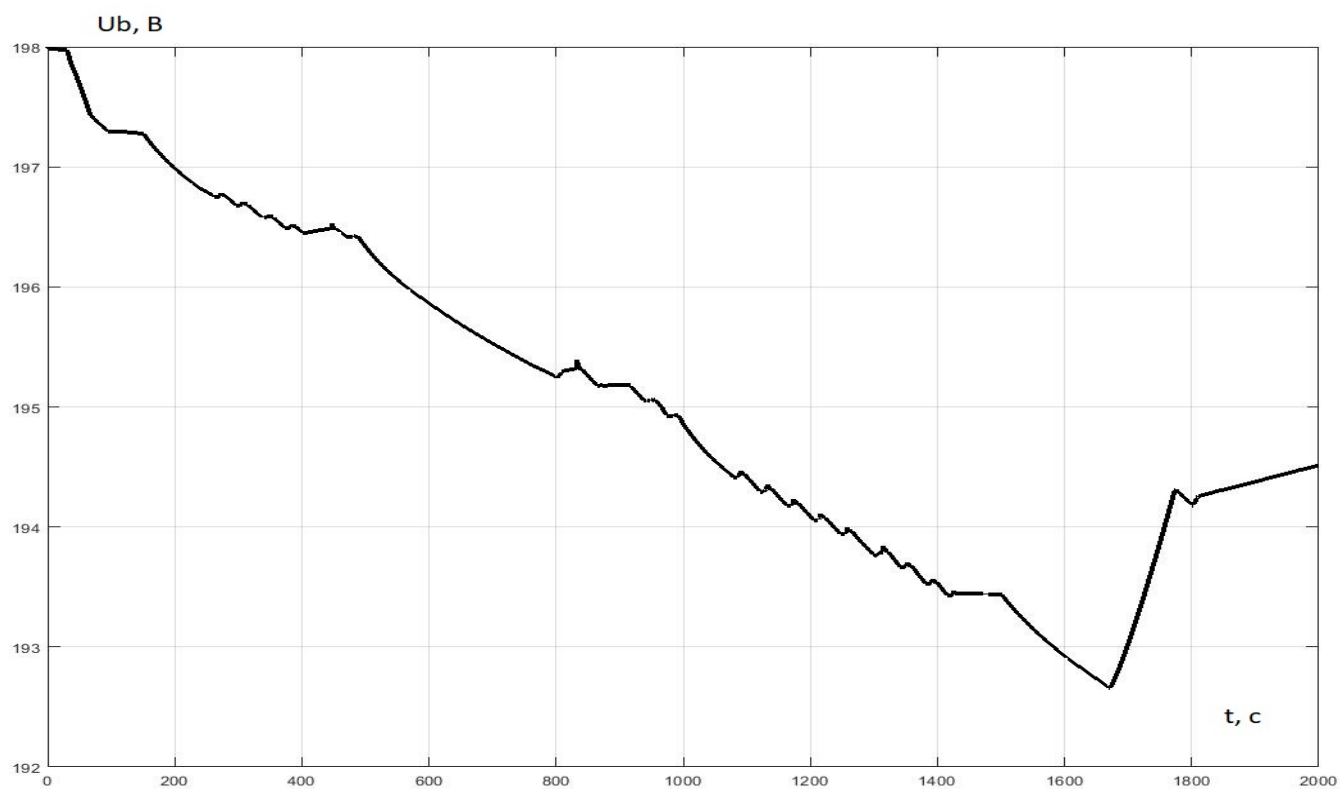


Рисунок 4.6 – Осцилограма рівня напруги акумуляторної батареї гібридного локомотива з поїздом

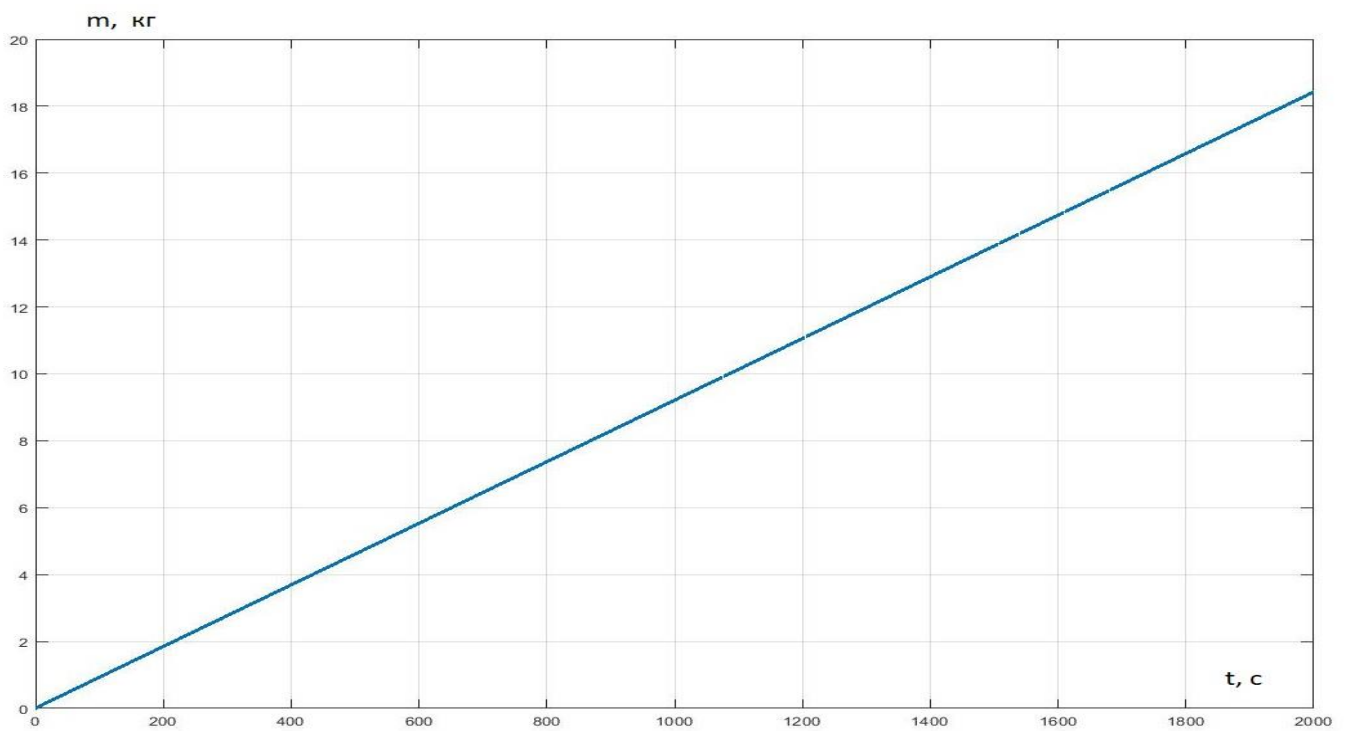


Рисунок 3.15 – Крива витрат палива гібридного локомотива з поїздом. За результатами таблиці 4.2 були побудовані тривимірні залежності у вигляді поверхонь: витрати палива (рис. 4.17), величина напруги АБ (рис. 4.18), величина напруги К (рис. 4.19) від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегonom.

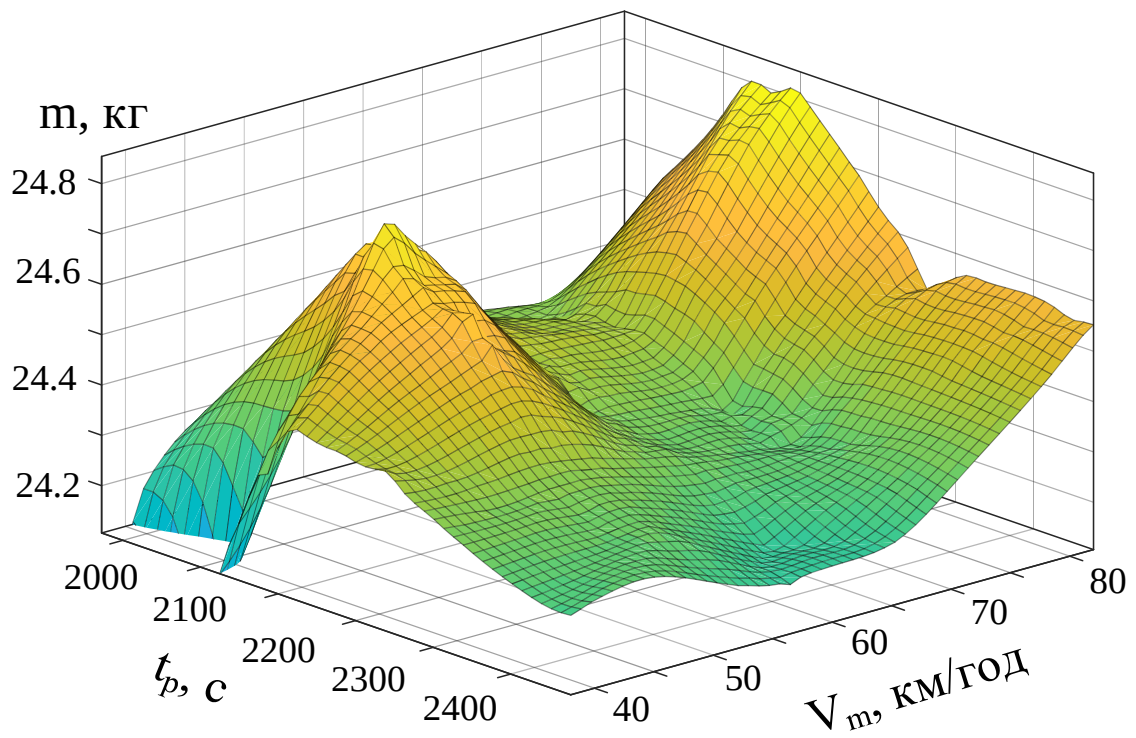


Рисунок 4.7 – Зміна витрат палива гібридним тепловозом з ВІД в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

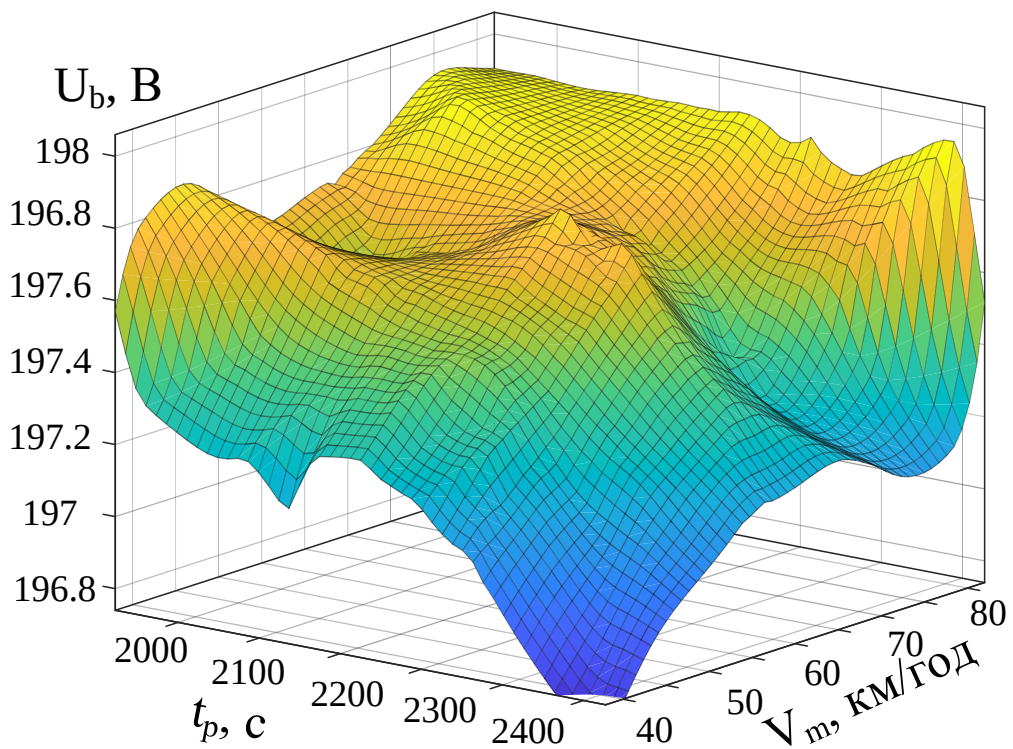


Рисунок 4.8 – Зміна напруги АБ в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

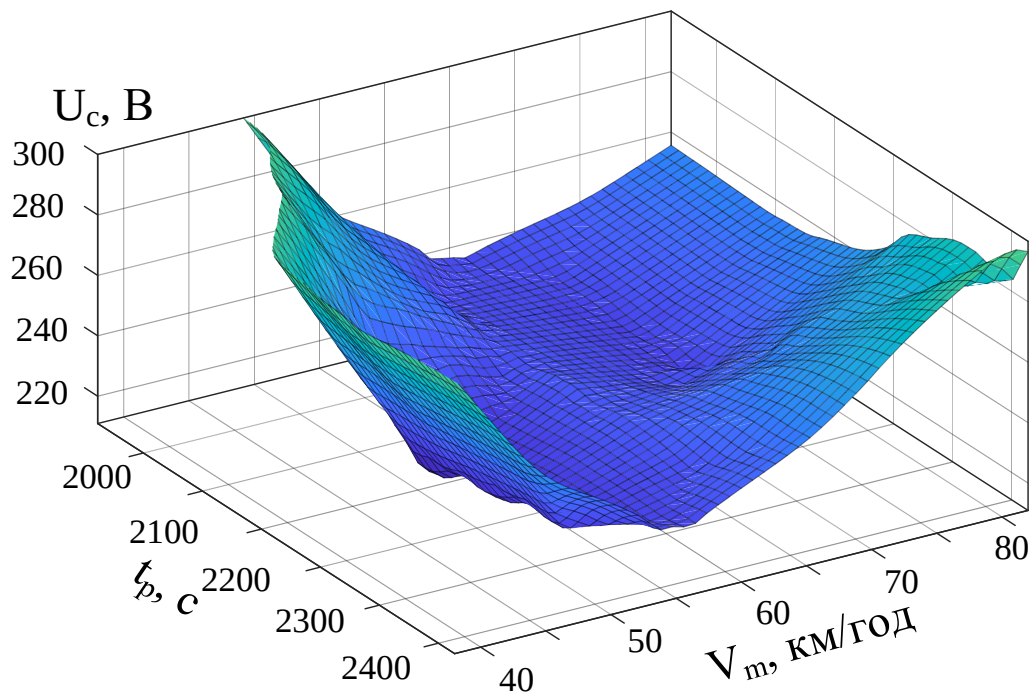


Рисунок 4.9 – Зміна напруги K в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

Аналіз отриманих поверхонь показує їх аналогію з залежностями, що спостерігались при використанні ДПС, але для АД у порівнянні з ДПС спостерігається тенденція більш інтенсивного зменшення витрат палива з ростом максимальних швидкостей трикутної тахограми (руху ділянкою) у діапазоні 80-95 км/год. Зменшення витрат палива в даному діапазоні складає 0,5-1,5%.

Величини екстремумів при швидкостях 80 км/год та 50 км/год з максимальною швидкістю на рівні 85 км/год складають 24,92 та 24,89 кг відповідно.

5 Визначення економічного ефекту від застосування гібридної силової установки на тепловозі ЧМЕЗ

5.1 Коротка характеристика запропонованого рішення

Як показує статистика, більше 40% маневрової роботи приходить на простій тепловоза ЧМЕЗ з двигуном, що працює, а 10-15% часу приходить на пересування без вагонів. Розподілення режимів роботи маневрового локомотива показане на рисунку 5.1.

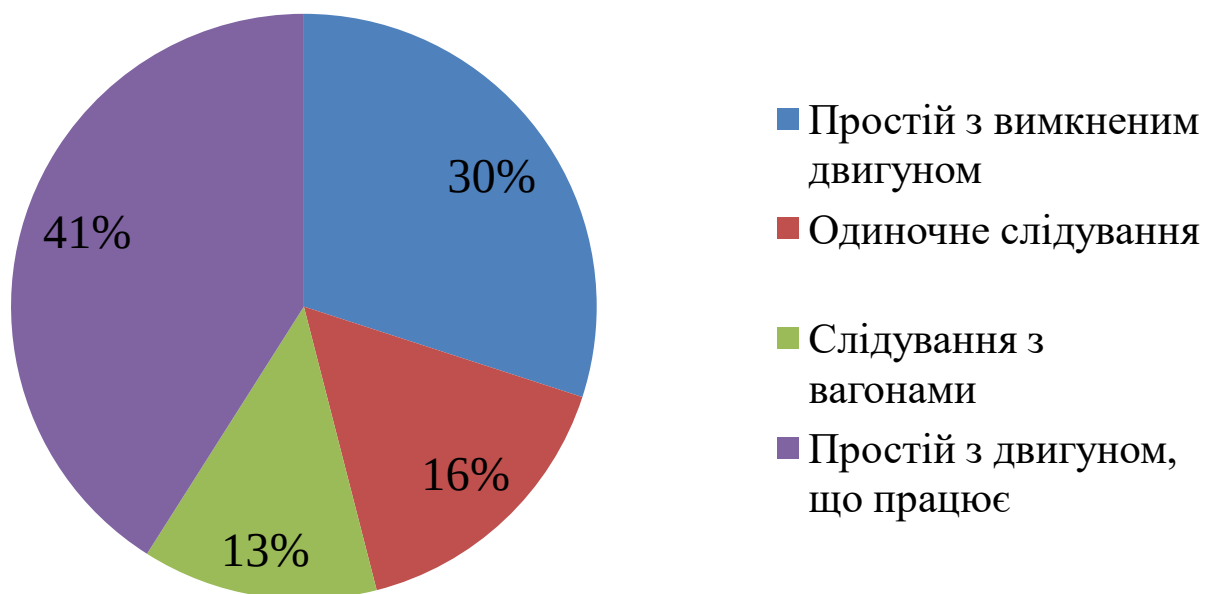


Рисунок 5.1 – Розподілення режимів роботи маневрового локомотива

З вище сказаного видно, що використання потужних маневрових тепловозів не оправдане економічно, тому що використання тепловозів при частковому завантаженні веде до перевитрат палива.

Запропонована модернізація включає встановлення дизеля C18 ACERT, синхронного генератора ГС-500-400, акумуляторної батареї LT-LYP 240,

суперконденсатора ІКЕ 40/96, вентильно-індукторних двигунів та статичного перетворювача на тепловоз ЧМЕЗ.

5.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_m) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу НТП за розрахунковий період (P_m) над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу НТП за розрахунковий період ($З_m$):

$$E_m = P_m - З_m \quad (5.1)$$

При розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу НТП моменту часу – розрахункового року t_p . Приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t , що визначається за формулою:

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t} \quad (5.2)$$

де E_n – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_n=0,10$;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

Економічний ефект визначається зменшенням витрат за період у відповідності з встановленими нормативами і розраховується за формулою:

$$E_T = E_T^n - E_T^{\delta} = З_T^{\delta} - З_T^n \quad (5.3)$$

При визначенні затрат необхідно керуватися такими принципами:

- до сумарних витрат на проведення заходу НТП включаються витрати як на розробку і виробництво, так і на використання нової техніки в усіх сферах народного господарства, тобто витрати всіх учасників реалізації заходу;
- до складу витрат входять всі види поточних і одноразових витрат;
- при визначенні сукупних витрат на захід, що охоплює розробку, виробництво і використання нової техніки, не допускається повторне урахування витрат;
- в розрахунках витрат необхідно враховувати їхню динаміку по всім рокам розрахункового періоду.

Витрати на реалізацію заходів НТП за розрахунковий період включають витрати при виробництві та використанні продукції

$$Z_t = Z_t^n + Z_t^u \quad (5.4)$$

де Z_t^n - витрати при виробництві нової техніки на основі заходу НТП за розрахунковий період, грн;

Z_t^u - витрати при використанні нової техніки (без урахування витрат на придбання самої продукції) за розрахунковий період, грн

5.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження гібридної силової установки з асинхронними двигунами

До капітальних вкладень на модернізацію одного тепловозу входять витрати, пов'язані з придбанням дизеля 2403644 грн, синхронного генератора 604423 грн, акумуляторної батареї 10817812 грн, суперконденсатору 1420671 грн, асинхронних двигунів 476150 грн та статичного перетворювача 1391000 грн, витрати на демонтаж базового обладнання і монтаж нового. Для модернізації необхідні 1 дизельний двигун, 1 генератор, 1 акумуляторна та 1 суперконденсаторна батареї, 6

асинхронних двигунів, 1 статичний перетворювач. Загальна вартість обладнання складає 19494451 грн

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та відрахування на соціальні заходи, що пов'язані з демонтажем базового обладнання та монтажем нового обладнання. Трудові витрати на демонтаж базового обладнання та монтаж нового обладнання представлені в таблиці, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів п'ятого розряду по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Витрати складуть, грн

$$B_{\text{МОНТ}} = Z_M \cdot m, \quad (5.5)$$

де m - кількість обладнання;

Z_M - витрати на монтаж обладнання, грн

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = Z_D \cdot m, \quad (5.6)$$

де m - кількість обладнання;

Z_D - витрати на демонтаж обладнання, грн

Таблиця 5.1 – Трудові витрати на демонтаж та монтаж обладнання

Вид робіт	Розряд	Кількість працівників	Годин. тариф. ставка	Кількість годин на одиницю	Основна заробітна плата, грн	Додаткова заробітна плата, грн	Відрах. на соц. заходи, грн.	Усього грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Демонтаж дизеля	5	5	50,46	8	2018,4	201,84	488,45	2708,69
Демонтаж генератора	5	5	50,46	5	1261,5	126,15	305,28	1692,93

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Демонтаж двигунів	5	3	50,46	8	1211,04	121,1	293,07	1625,22
Демонтаж акумуляторної батареї	5	2	50,46	2	201,84	20,18	48,85	270,87
Монтаж дизеля	5	5	50,46	8	2018,4	201,84	488,45	2708,69
Монтаж генератора	5	5	50,46	5	1261,5	126,15	305,28	1692,93
Монтаж акумуляторної батареї	5	3	50,46	5	759,9	75,69	183,17	1015,76
Монтаж суперконденс.	5	3	50,46	5	759,9	75,69	183,17	1015,76
Монтаж статичного перетворювача	5	2	50,46	5	504,6	50,45	122,11	677,17
Монтаж двигунів	5	5	50,46	8	2018,4	201,84	488,45	2708,69

Затрати на матеріали приймаємо 32233 грн

Підставляємо значення та отримуємо:

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = 2708,69 + 1692,93 + 1625,22 \cdot 6 + 270,87 = 14423,79 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ}} = 2708,69 + 1692,93 + 1015,76 + 1015,76 + 677,17 + 2708,69 \cdot 6 = 23362,48 \text{ грн}$$

В загальному вигляді капітальні вкладення на модернізацію одного тепловоза складають, грн:

$$\Delta K = \Sigma B_{\text{ПО}} + B_{\text{МОНТ}} + B_{\text{ДЕМОНТ}} + B_{\text{м}}, \quad (8.7)$$

де $\Sigma B_{\text{ПО}}$ – витрати на придбання обладнання, грн;

B_m - витрати на матеріали, грн

$$\Delta K = 19494451 + 14423,79 + 23362,48 + 32233 = 19564470 = 19564,47 \text{ тис.грн}$$

У даному розділі розрахунок економічного ефекту базується на отриманні прибутку від нововведення за рахунок економії дизельного палива на роботу тепловоза та витрат на його обслуговування та ремонт.

Одержуємо витрати дизельного палива на роботу одного тепловоза базового варіанту і нового варіанту.

Середньорічний бюджет часу тепловозу

$$K_{об} = 365 \cdot 24 - (\sum T_{TP1} + \sum T_{TP2} + \sum T_{TP3} + \sum T_{mo3} + \sum T_{mo2}) , \quad (5.8)$$

де, $\sum T_{TP3}, \sum T_{TP2}, \sum T_{TP1}$ - простій на ремонті ПР3, ПР2, ПР1 середньорічний, год;

$\sum T_{mo3}, \sum T_{mo2}$ - простій на технічному обслуговуванні ТО3 та ТО2 в

середньому за рік, год.

Простій на i - виді ремонту за рік

$$\sum T_i = \sum M_i \cdot t_{рем_i} , \quad (5.9)$$

де $\sum M_i$ - кількість i -тих видів ремонтів за рік;

$t_{рем_i}$ - норма простою на ремонт i -ого виду ремонту, год.

Кількість ремонтів i -го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{t_{pic}}{t_{рем_i}} , \quad (5.10)$$

де $t_{piч}$ - річний фонд робочого часу тепловоза $t_{piч}=365$ діб;

$$M_{\Pi P3} = \frac{t_{piч}}{30,4 \cdot t_{\Pi P3}}; \quad (5.11)$$

$$M_{\Pi P2} = \frac{t_{piч}}{30,4 \cdot t_{\Pi P2}} - M_{\Pi P3}; \quad (5.12)$$

$$M_{\Pi P1} = \frac{t_{piч}}{30,4 \cdot t_{\Pi P1}} - M_{\Pi P2}; \quad (5.13)$$

$$M_{TO3} = \frac{t_{piч}}{t_{TO3}} - M_{\Pi P1}, \quad (5.14)$$

де $t_{\Pi P3}$, $t_{\Pi P2}$, $t_{\Pi P1}$, t_{TO3} - міжремонтні періоди;

$$t_{\Pi P3}=36 \text{ міс.};$$

$$t_{\Pi P2}= 18 \text{ міс.};$$

$$t_{\Pi P1}=9 \text{ міс.};$$

$$t_{TO3}=45 \text{ діб.}$$

$$\sum M_{\Pi P3} = \frac{365}{36 \cdot 30,4} = 0,334$$

$$\sum M_{\Pi P2} = \frac{365}{18 \cdot 30,4} - 0,334 = 0,333$$

$$\sum M_{пп1} = \frac{365}{9 \cdot 30,4} - 0,333 = 1,67$$

$$\sum M_{то3} = \frac{365}{45} - 1,67 = 6,44$$

Розрахуємо кількість ТО-2 за рік:

$$\sum M_{то-2} = \frac{365}{2} - \sum M_{mp3} - \sum M_{mp2} - \sum M_{mp1} - \sum M_{mo3} \quad (5.15)$$

$$\sum M_{то-2} = \frac{365}{2} - 0,334 - 0,333 - 1,67 - 6,44 = 173,72$$

Таким чином середньорічний простій тепловозу на і-му виді ремонту складає

$$\sum T_{пп3} = 0,334 \cdot 120 = 40,08 \text{ год.},$$

$$\sum T_{пп2} = 0,333 \cdot 96 = 31,97 \text{ год.},$$

$$\sum T_{пп1} = 1,67 \cdot 24 = 40,08 \text{ год.},$$

$$\sum T_{то3} = 6,44 \cdot 12 = 77,28 \text{ год.},$$

$$\sum T_{то2} = 173,72 \cdot 0,5 = 86,86 \text{ год.}$$

Ефективний фонд робочого часу тепловоза

$$T_{ef} = 365 \cdot 24 - (40,08 + 31,97 + 40,08 + 77,28 + 86,86) = 8483,73 \text{ год.}$$

Весь ефективний фонд робочого часу поділяється на чотири режими роботи: простій з вимкненим двигуном 30% фонду робочого часу, простій з двигуном, що працює, 41%, одиночне слідування 13%, слідування з вагонами 16%. Звідси маємо:

$$t_{\text{вимк.дв.}} = 0,3 \cdot 8483,73 = 2545,12 \text{ год.}$$

$$t_{\text{прац.дв.}} = 0,41 \cdot 8483,73 = 3478,33 \text{ год.}$$

$$t_{\text{од.слід.}} = 0,13 \cdot 8483,73 = 1102,88 \text{ год.}$$

$$t_{\text{слід.ваг.}} = 0,16 \cdot 8483,73 = 1357,4 \text{ год.}$$

Витрати палива тепловозом розраховуємо виходячи з годинних витрат палива дизелем, що наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Годинні витрати палива тепловозом

Показник	Позиція контролера машиніста								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Витрати палива, кг/год	8	31	63	96	110	120	160	174	180

При маневровій роботі існує наступне розподілення позицій контролера машиніста, що отримане на основі статистичних даних, яке наведене у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Розподілення позицій контролера машиніста при маневровій роботі

Показник	Позиція контролера машиніста
----------	------------------------------

	1	2	3	4	5	6	7	8
Час роботи, %	8,99	32,11	32,11	16,15	7,52	2,2	0,55	0,37

Річні витрати палива тепловозом при слідуванні з вагонами:

$$B_{\text{ДПсл.ваг.}} = 13574 \cdot (0,089931 + 0,321163 + 0,321196 + 0,1615110 + 0,0752120 + 0,022160 + 0,0055174 + 0,0037180) = 11643 \text{ т}$$

При одиночному слідуванні найчастіше використовується 3 позиція контролера машиніста, тому річні витрати палива тепловозом при одиночному слідуванні складають:

$$B_{\text{ДПод.сл.д.}} = 110288 \cdot 63 = 69,48 \text{ т}$$

Річні витрати при простої з двигуном, що працює, складають:

$$B_{\text{ДПпрац.двиг.}} = 3478,33 \cdot 8 = 27,83 \text{ т}$$

Річна витрата палива базовим тепловозом складе:

$$B_{\text{ДП.Заг.}} = 116,43 + 69,48 + 27,83 = 213,74 \text{ т}$$

Визначимо річні витрати на дизельне паливо $З_{\text{П}}^{\text{Д}}$ за формулою:

$$B_{\text{П}}^{\text{Д}} = B_{\text{ДП.Заг.}} \cdot \text{Ц}_{\text{П}}, \quad (5.16)$$

де $\text{Ц}_{\text{П}}$ - ціна дизельного палива за 1 тону, $\text{Ц}_{\text{П}} = 55$ тис.грн/т

$$B_{\text{П.Б.}}^{\text{Д}} = 213,74 \cdot 55 = 11755,7 \text{ тис.грн}$$

У модернізованому варіанті дизельний двигун працює тільки у випадку слідування з вагонами на номінальній частоті обертання колінчастого валу дизеля. У цьому режимі витрати палива складають 86 кг/год. Річна витрата палива складе:

$$B_{ДП.Заг..} = 1357,4 \cdot 86 = 116,73 \text{ т}$$

Витрати на паливо складуть:

$$B_{П.М.}^Д = 116,73 \cdot 55 = 6420,15 \text{ тис.грн}$$

Загальна економія за рахунок зменшення споживання палива тепловозом складе:

$$\Delta E_{нал.річ.} = B_{П.Б.}^Д - B_{П.М.}^Д \quad (5.17)$$

$$\Delta E_{нал.річ.} = 11755,7 - 6420,15 = 5335,55 \text{ тис.грн}$$

Визначаємо економію витрат на ремонт:

Таблиця 5.4 – Визначення загальної вартості ремонту базового тепловоза

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту, грн	Кількість одиниць, шт	Вартість ремонту обладнання тепловозу, грн
Вартість ремонту дизеля K6S310DR				
ПР3	0,334	1896,7	1	633,50
ПР2	0,333	1254,89	1	417,88

ПР1	1,67	598,41	1	999,34
ТО3	6,44	372,95	1	2401,80
ТО2	173,72	285,74	1	49638,75
Разом				54091,27
Вартість ремонту генератора постійного струму				
ПР3	0,334	895,21	1	299,00
ПР2	0,333	427,58	1	142,38
ПР1	1,67	211,53	1	353,26
ТО3	6,44	154,68	1	996,14
ТО2	173,72	128,46	1	22316,07
Разом				24106,85
Вартість ремонту двигунів постійного струму				
ПР3	0,334	902,21	6	1808,03
ПР2	0,333	468,73	6	936,52
ПР1	1,67	208,84	6	2092,58
ТО3	6,44	161,95	6	6257,75
ТО2	173,72	124,51	6	129779,26
Разом				140874,14
Загальні витрати на ремонт				219072,26

Таблиця 5.5 – Визначення загальної вартості ремонту модернізованого тепловоза

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту, грн	Кількість одиниць, шт	Вартість ремонту обладнання тепловозу, грн
1	2	3	4	5
Вартість ремонту дизеля				
ПР3	0,334	2496,36	1	833,78
ПР2	0,333	1549,12	1	515,86
ПР1	1,67	657,24	1	1097,59
ТО3	6,44	372,95	1	2401,80
ТО2	173,72	285,74	1	49638,75
Разом				54487,78
Вартість ремонту синхронного генератора				
ПР3	0,334	1258,96	1	420,49
ПР2	0,333	986,34	1	328,45
ПР1	1,67	158,93	1	265,41
ТО3	6,44	0	1	0
ТО2	173,72	0	1	0
Разом				1014,36
Вартість ремонту акумуляторної та суперконденсаторної батарей				
ПР3	0,334	152,34	1	50,88
ПР2	0,333	98,64	1	32,85
ПР1	1,67	46,52	1	77,69
ТО3	6,44	28,15	1	181,29
ТО2	173,72	16,8	1	2918,50
Разом				3261,20
Вартість ремонту статичного перетворювача				

ПР3	0,334	202,87	1	67,76
ПР2	0,333	158,9	1	52,91
ПР1	1,67	115,8	1	193,39
ТО3	6,44	0	1	0
ТО2	173,72	0	1	0
Разом				314,06
Вартість ремонту асинхронних двигунів				
ПР3	0,334	501,95	6	1005,91
ПР2	0,333	398,45	6	796,10
ПР1	1,67	325,84	6	3264,92
ТО3	6,44	0	6	0
ТО2	173,72	0	6	0
Разом				5066,93
Загальні витрати на ремонт				64144,32

При виконанні ТО-2, ТО-3 тепловозу завжди проводять огляд та обслуговування колекторних машин (двигунів та генератора). При заміні колекторних машин на безколекторні огляд виконувати не потрібно. Тим самим зменшується час виконання технічного обслуговування та затрати на його проведення.

Таким чином річна економія поточних витрат на ремонт електровоза

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{рем}} = 219072,26 - 64144,32 = 154927,94 \text{ грн} = 154,93 \text{ тис. грн}$$

Загальна економія витрат складе

$$\Delta E_{\text{річ}}^{\text{заг}} = 5335,55 + 154,93 = 5490,48 \text{ тис. грн}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюється у табличній формі (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Капітальні вкладення K_t , тис.грн	19564,47									
Економія поточних витрат Δu_t , тис. грн	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48
Економічний ефект E_t , тис.грн	-14074	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48	5490,48
Коефіцієнт приведення α_t	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467	0,424	0,386
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-12794,5	4537,6	4125,1	3750,1	3409,2	3099,2	2817,5	2561,3	2328,5	2116,8
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \dots + E_k$ тис.грн	-12794,5	-8256,9	-4131,9	-381,8	3027,4	6126,6	8944,1	11505	13833	15950

З таблиці видно, що за життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 15950000 тис.грн, що вказує на доцільність запропонованої модернізації електровоза тепловозу ЧМЕЗ. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 5 років.

Висновки

Тепловоз ЧМЕЗ – чехословацький маневровий тепловоз з електричною передачею з осьовою формулою 3о–3о.

Станом на 2009 рік тепловози ЧМЕЗ крім своїх основних функцій, часто використовуються, як локомотиви приміських поїздів на коротких мало задіяних ділянках.

Для проведення модернізації тягового електроприводу розроблена математична модель існуючої системи, що застосована на тепловозі ЧМЕЗ, та досліджені її властивості. Математичне моделювання тепловоза проведено поблоково.

Практичним рішенням у створенні локомотива, який задовольняє сучасним вимогам, є використання комбінованої (гібридної) силової установки. Така установка складається з блоку накопичувачів енергії, наприклад, тягової акумуляторної батареї, і дизель-генераторної установки (ДГУ) невеликої потужності. Подібне рішення дозволяє скоротити витрату палива не менше ніж на 40%, так як більша частина маневрової роботи буде здійснюватися на живленні від тягової акумуляторної батареї, і забезпечити високу екологічну чистоту локомотива.

Електропривод з СПК в теперішній час найбільш часто застосовується для приводу механізмів різних машин, що потребують плавного регулювання швидкості в широких межах, зокрема і залізничного транспорту.

Модальний регулятор є без інерційним регулятором. Він встановлюється в ланцюгу зворотного зв'язку. На його вході здійснюється алгебраїчне складання всіх зворотних зв'язків по вектору стану.

Якщо одна, чи декілька змінних стану не можуть бути вимірними, то для їхньої ідентифікації можна використовувати спостерігачі стану. Задачі, у яких не можуть бути вимірними усі компоненти стану, відносяться до задач керування, або компенсації збурень при неповній інформації про об'єкт регулювання.

Запропонована модернізація включає встановлення дизеля C18 ACERT, синхронного генератора ГС-500-400, акумуляторної батареї LT-LYP 240, суперконденсатора ІКЕ 40/96, асинхронного двигуна.

За життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 15507тис.грн, що вказує на доцільність запропонованої модернізації електровоза тепловозу ЧМЕЗ. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 4 роки.

Список використаних джерел

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
3. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування: Підручник., – Л.: Львівська політехніка, 2012. - 280 с
4. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: курс лекцій (частина перша) – К.: НУХТ, 2004 –124 с.
5. Основи електроприводу: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. 2010.
6. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
7. Electrical Drives. Principles-Planning-Applications-Solutions. Jens Weidauer, Richard Messer / Siemens, 2015, англійською мовою.
8. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: Навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношاپка, М.Я. Островерхов. – К.: 2020.
- 9 Сенько, В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв. [Текст]: Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
- 10 Банєв, Є.Ф. Енергоресурсозберігаючий електропривод ескалатора метрополітена [Текст]: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Є.Ф. Банєв. Харків, 2013. – 140 с.
- 11 Чорний, О.П. Моделювання електромеханічних систем [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 376 с.
- 12 Приймак, Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами [Текст] / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

Додаток А
Ілюстраційний матеріал

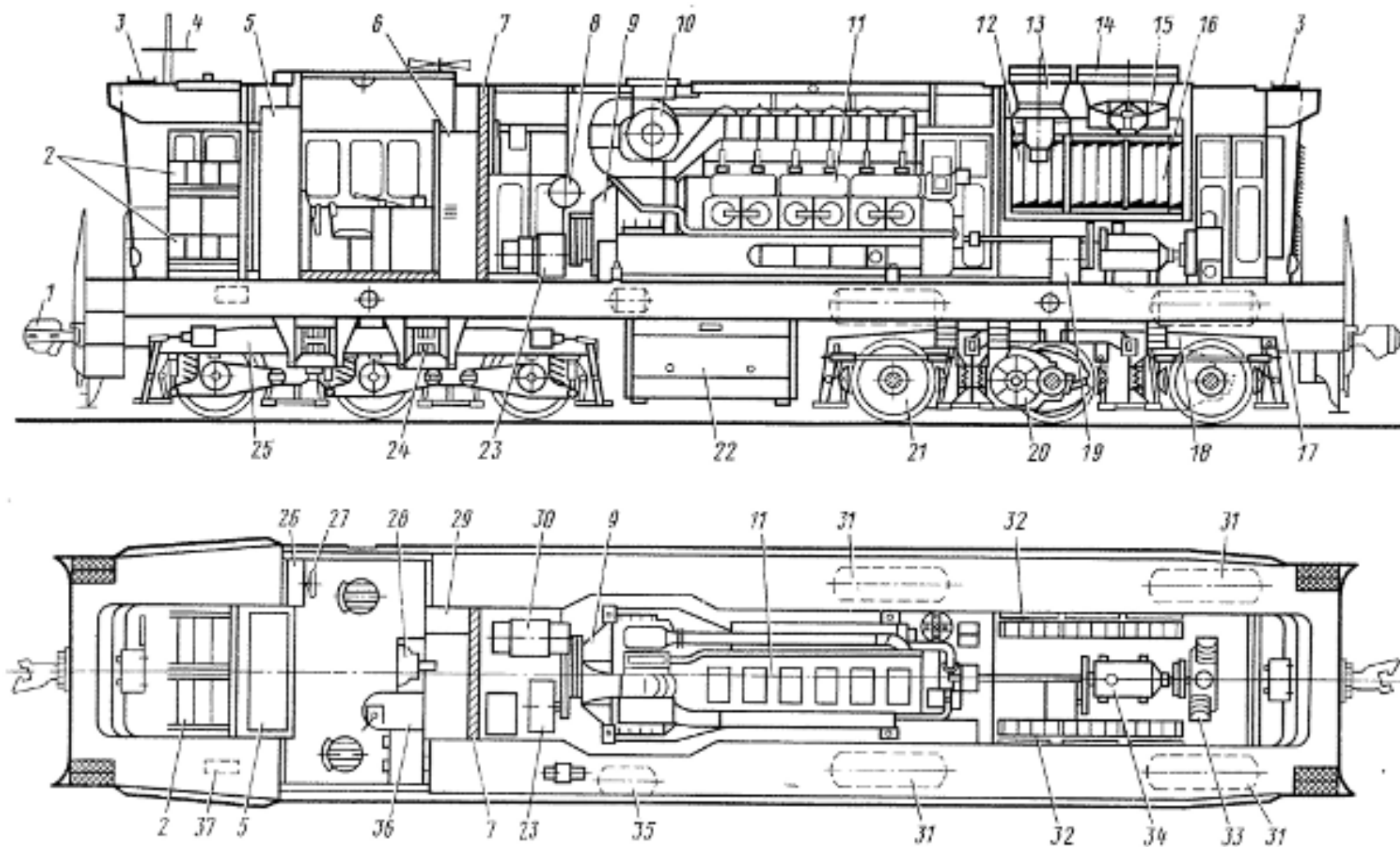
Підвищення енергоефективності маневрового тепловоза ЧМЕЗ шляхом застосування накопичувачів енергії

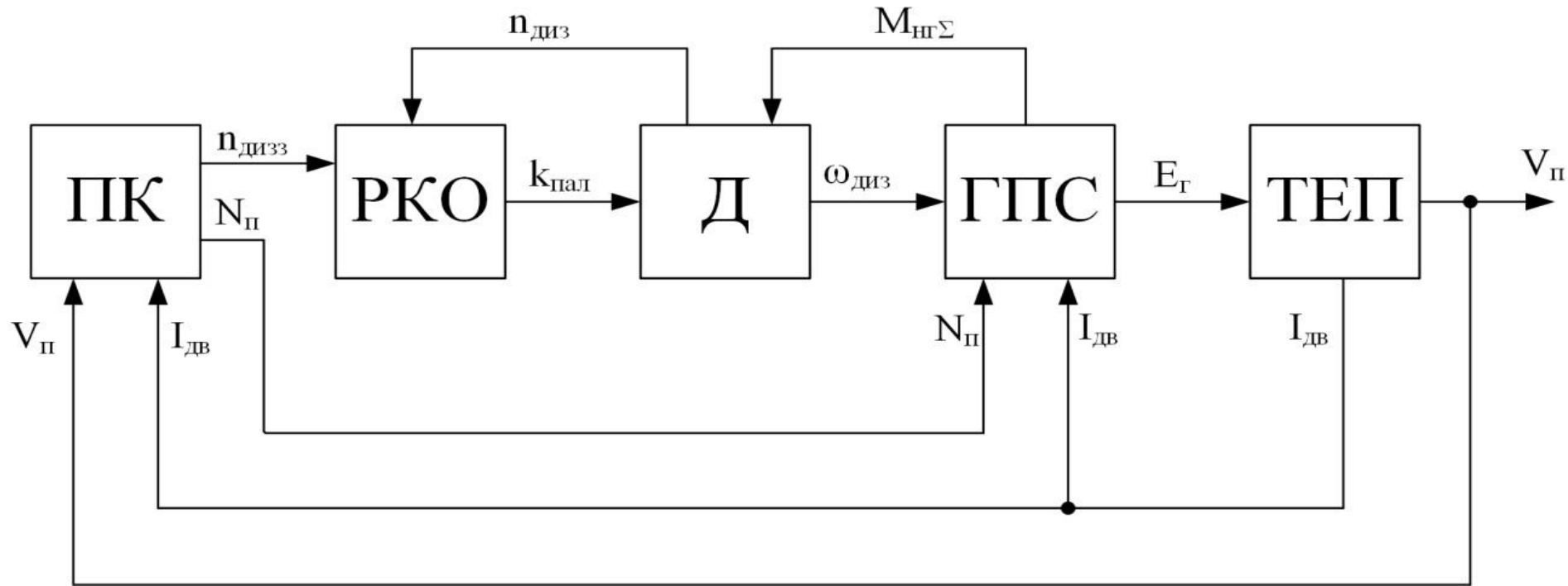


Виконав:
студент групи 214-ЕЕ-323
Олександр ТЮМЕНЦЕВ
Керівник:
к.т.н., доц. Артем МАСЛІЙ

- Розробка імітаційної моделі базового тепловоза та дослідження його роботи по заданому профілю;
- Розробка запропонованої гібридної системи накопичувачами енергії на базі тепловозу ЧМЕЗ;
- Створення імітаційної моделі роботи гібридного маневрового тепловоза з асинхронним приводом;
- Аналіз роботи нової систем для маневрового тепловоза;
- Економічне обґрунтування доцільності модернізації тепловоза.

Загальний вид тепловозу ЧМЕЗ





Функціональна схема моделі тепловозу ЧМЕЗ:

ПК – пульт керування; РКО – регулятор кількості обертів дизеля; Д – дизель; ГПС – генератор постійного струму зі збуджувачем; ТЕП – тяговий електропривод

Структурні схеми основних вузлів тепловоза ЧМЕЗ 5

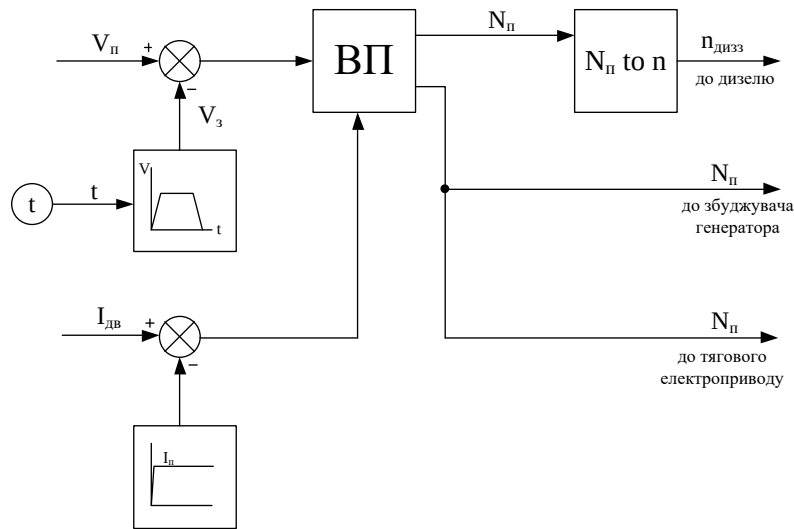


Рисунок 1 – Структурна схема моделі пульта керування

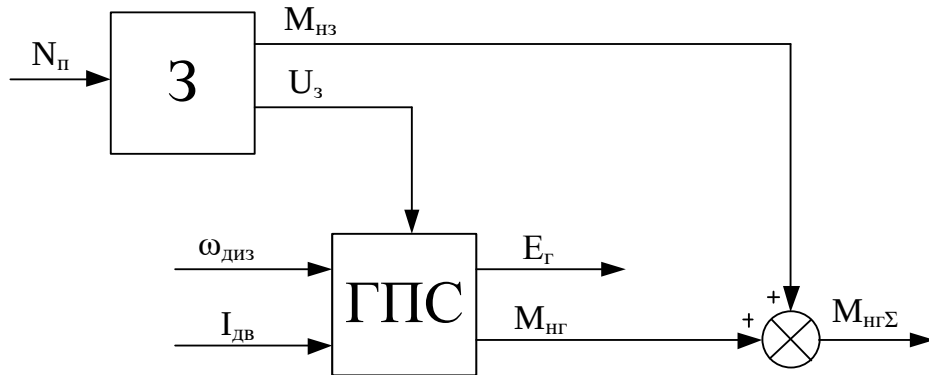


Рисунок 3 – Структурна схема імітаційної моделі роботи генератора постійного струму зі збуджувачем

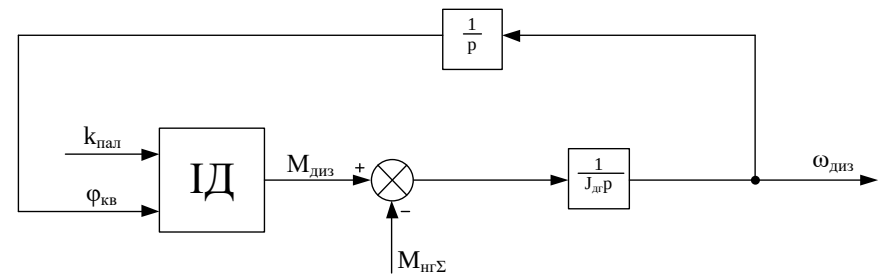


Рисунок 2 – Структурна схема імітаційної моделі роботи дизеля K6S310DR

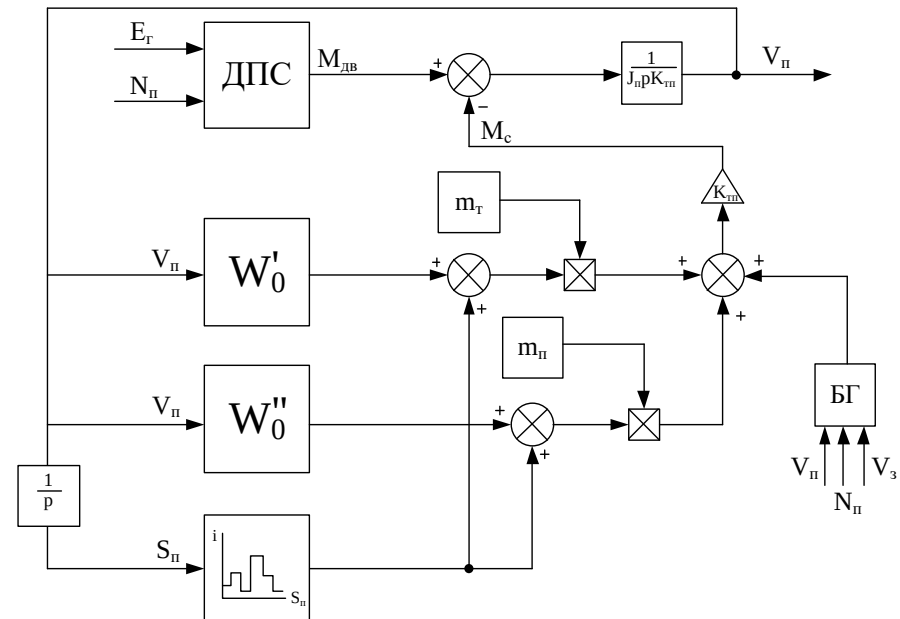


Рисунок 4 – Структурна схема імітаційної моделі тягового електроприводу тепловоза

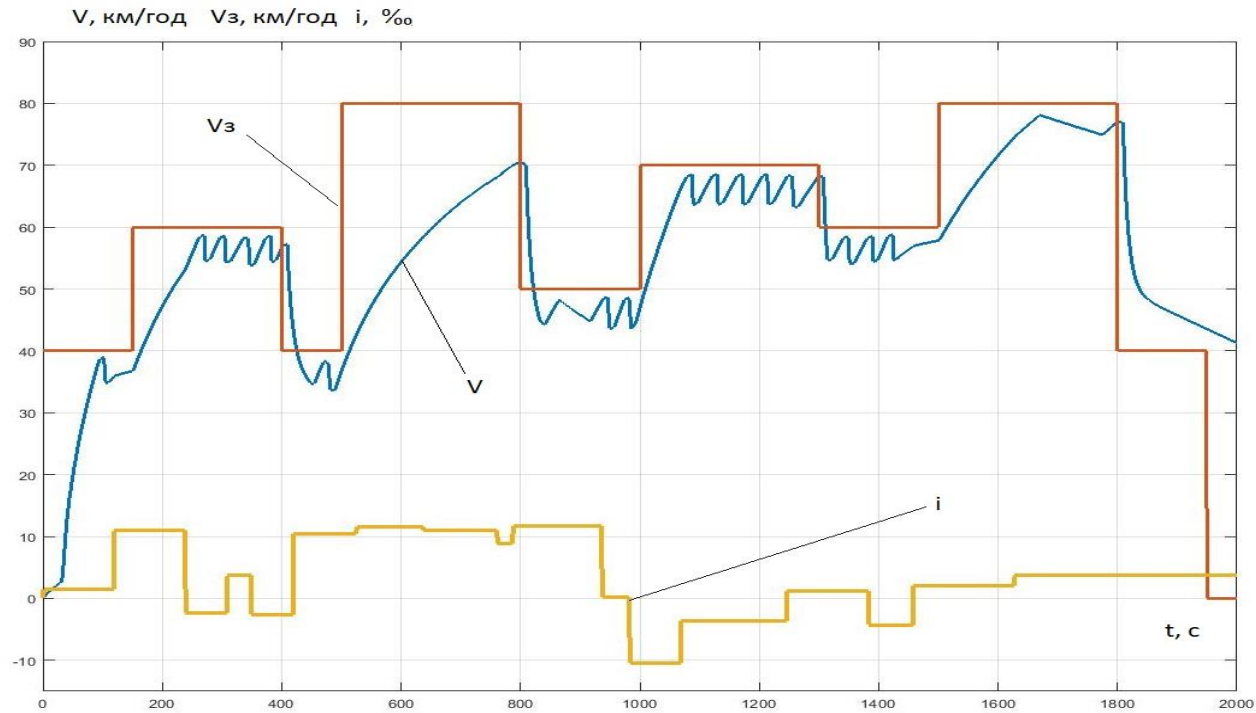


Рисунок 1 – Осцилограма роботи локомотива: задана швидкість, реальна швидкість потяга, профіль шляху

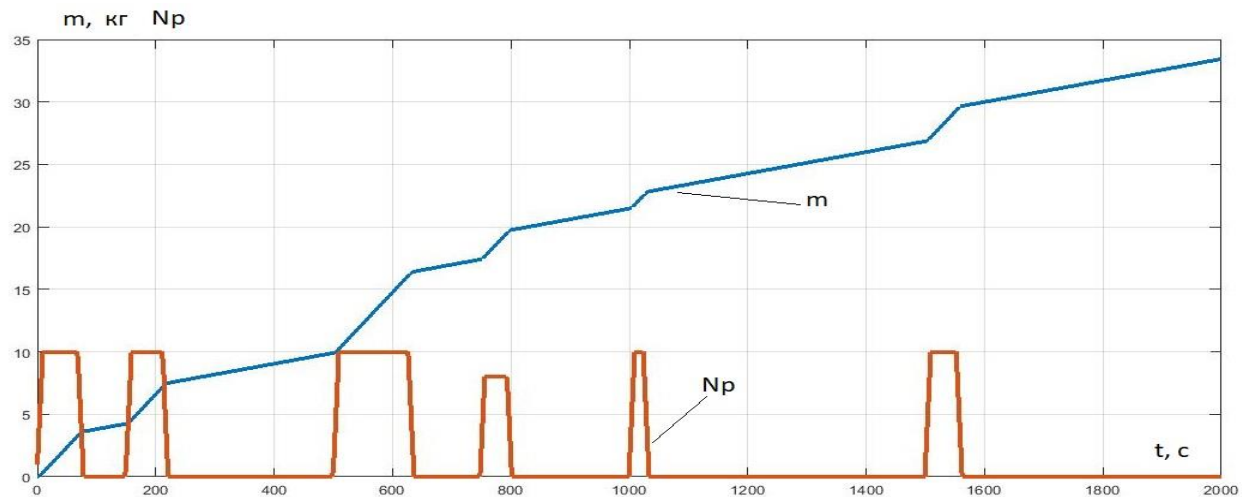
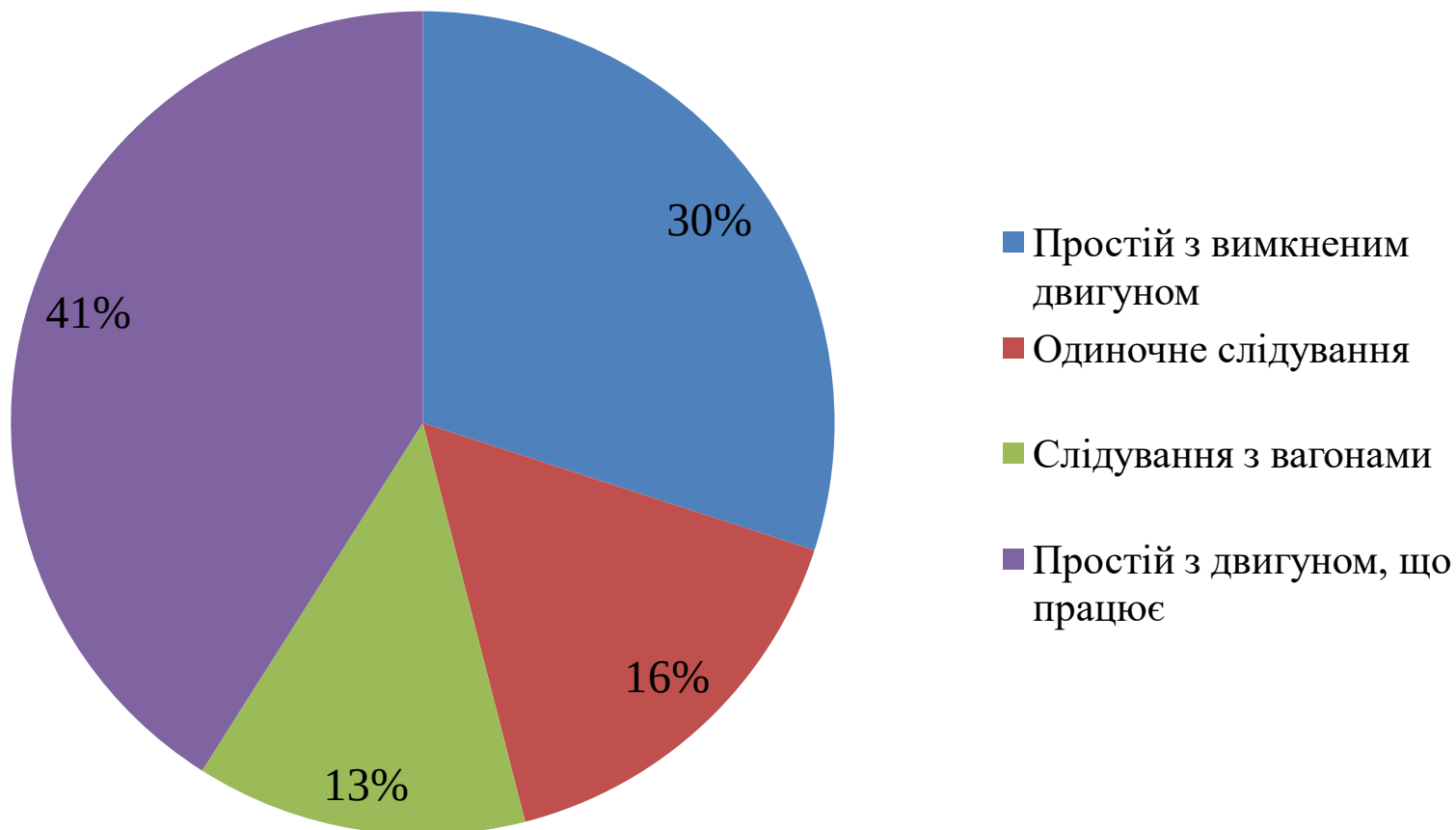


Рисунок 2 – Осцилограма позицій локомотива та розходу палива

Режими роботи маневрових тепловозів



Перспективи застосування гібридних силових установок на тепловозі ЧМЕЗ 8

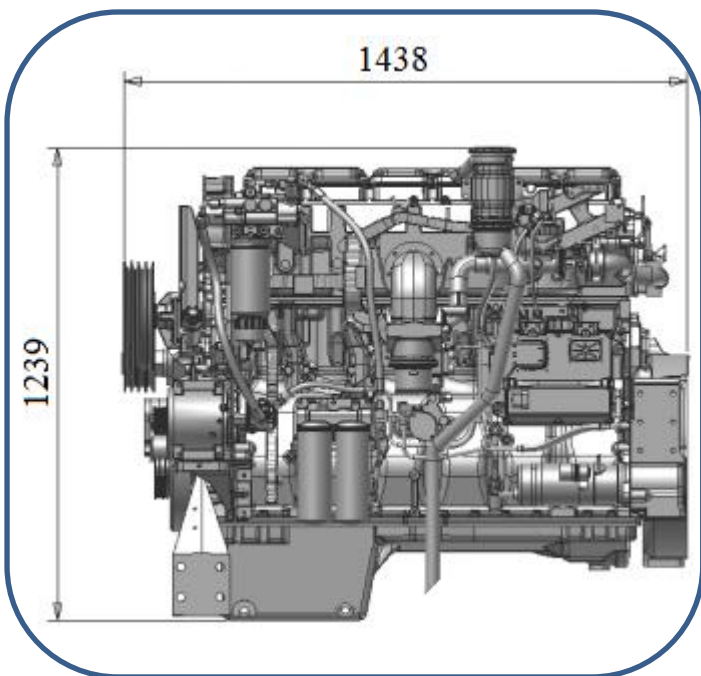
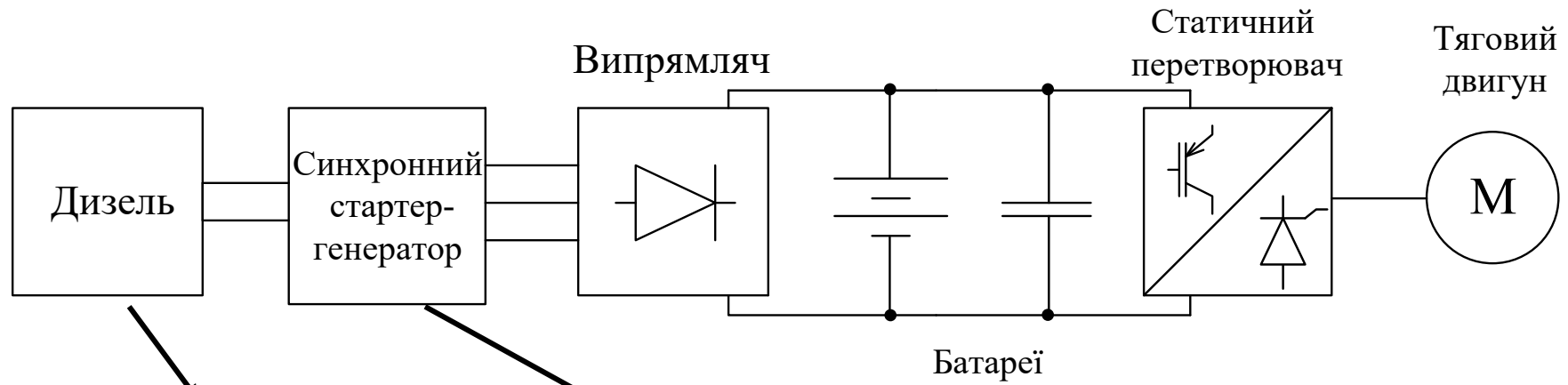


Рисунок 1 - Дизель С18 ACERT



Рисунок 2 - Генератор ГС-500-400



Рисунок 3 - Акумулятор LT-LYP 240 та суперконденаторна батарея ІКЕ 40/96

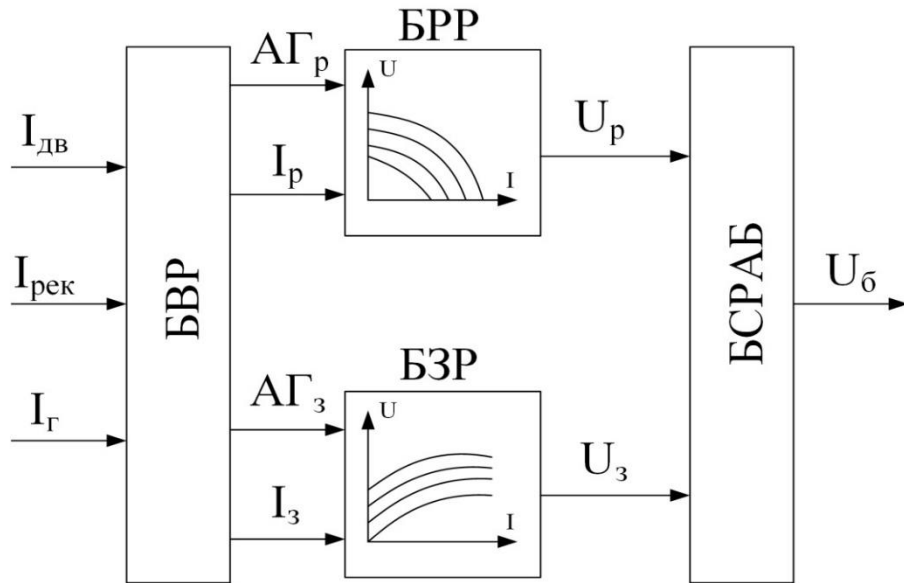


Рисунок 1 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

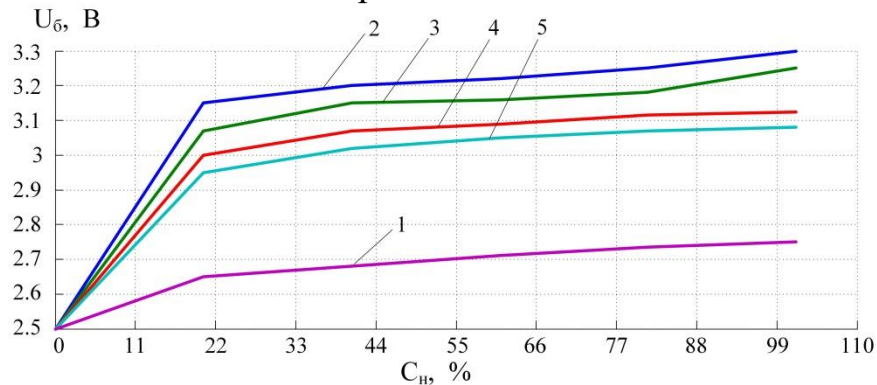


Рисунок 2 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

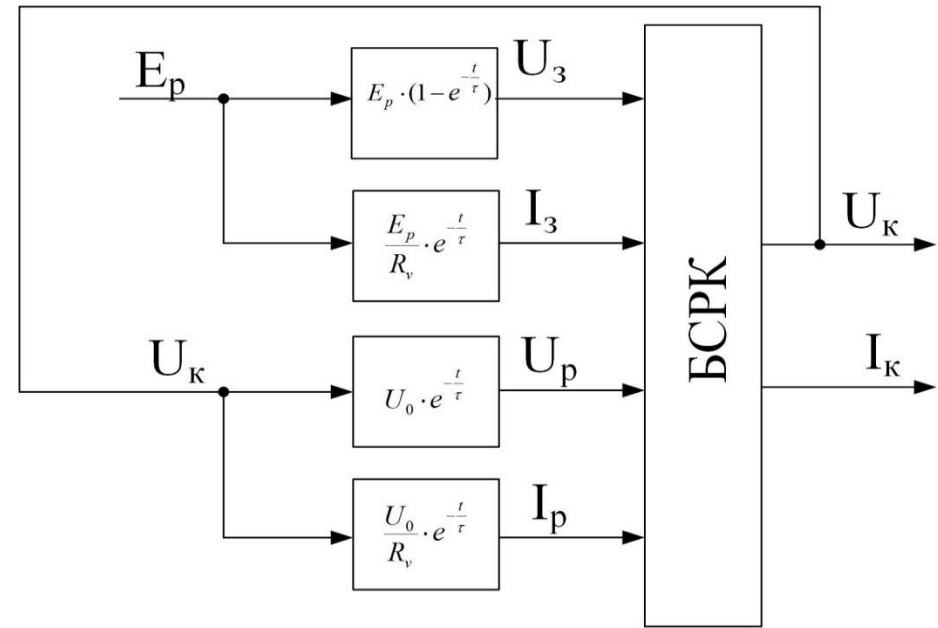


Рисунок 4 – Функціональна схема моделі іоністора: БСРК – блок синхронізації режимів роботи конденсаторної батареї

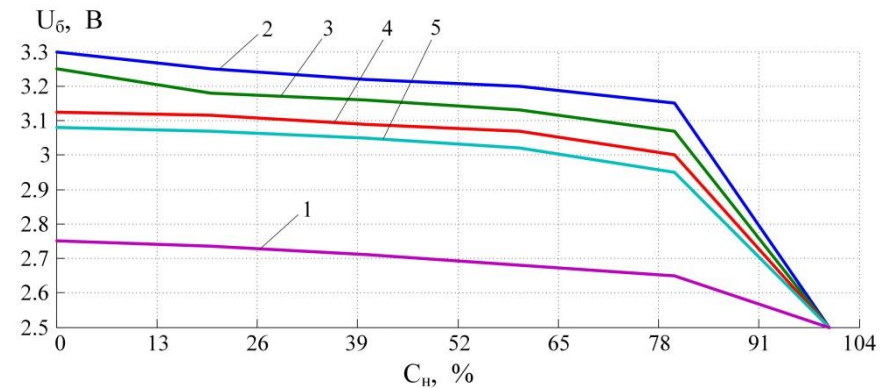
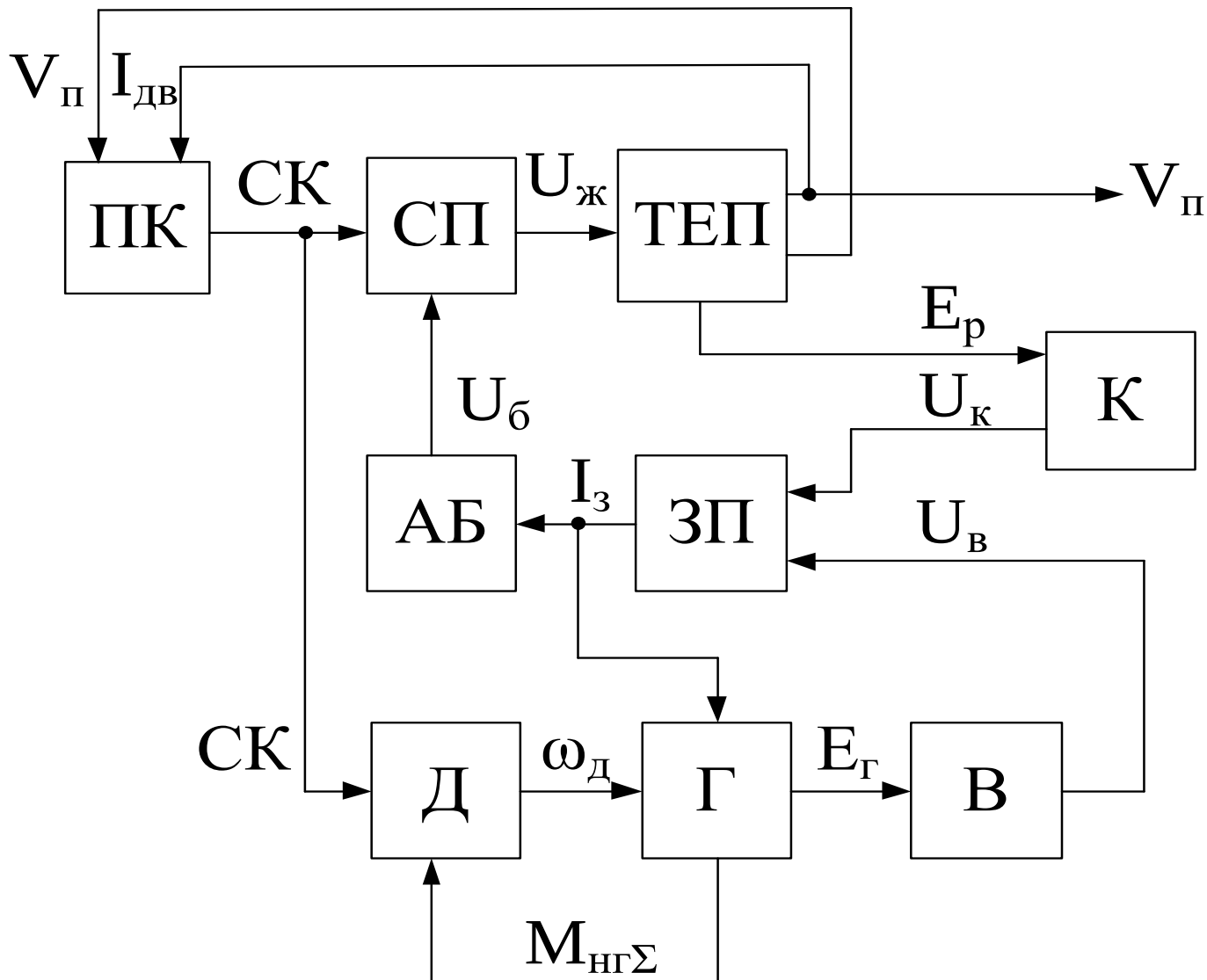
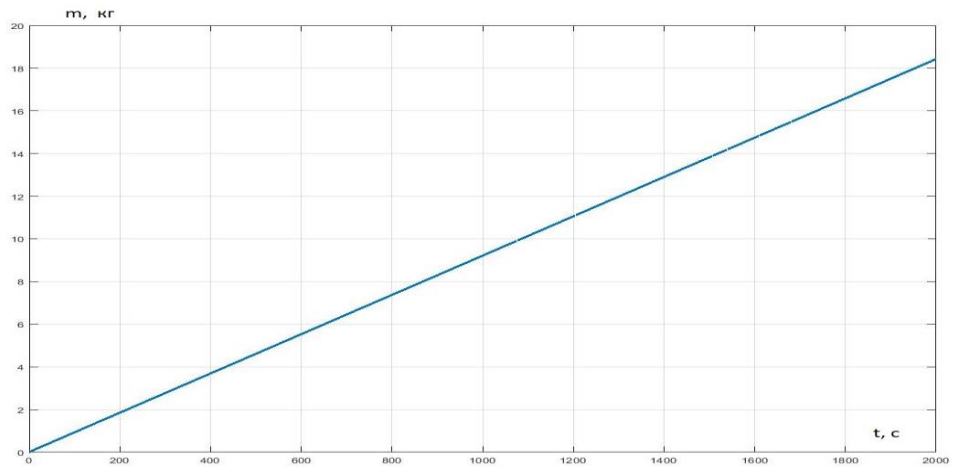
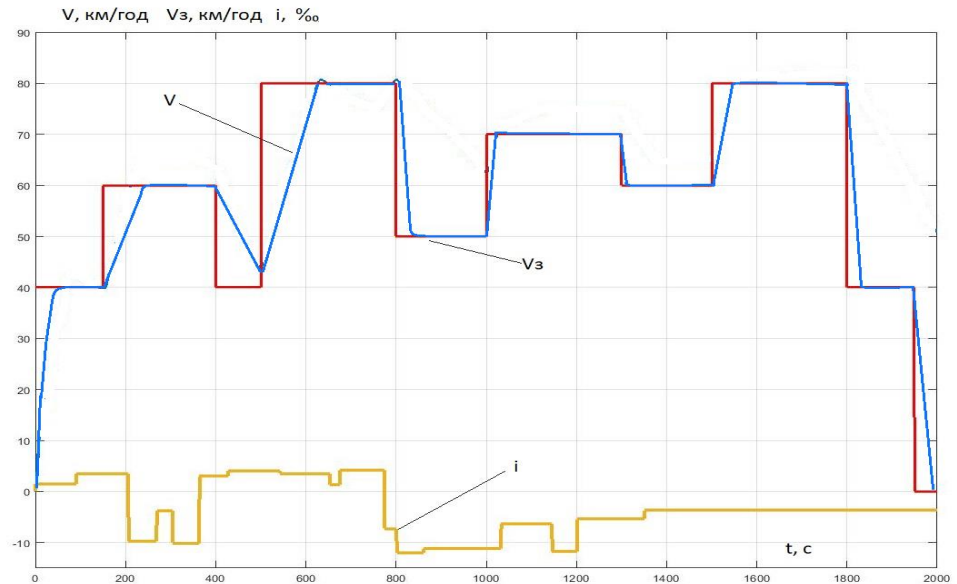
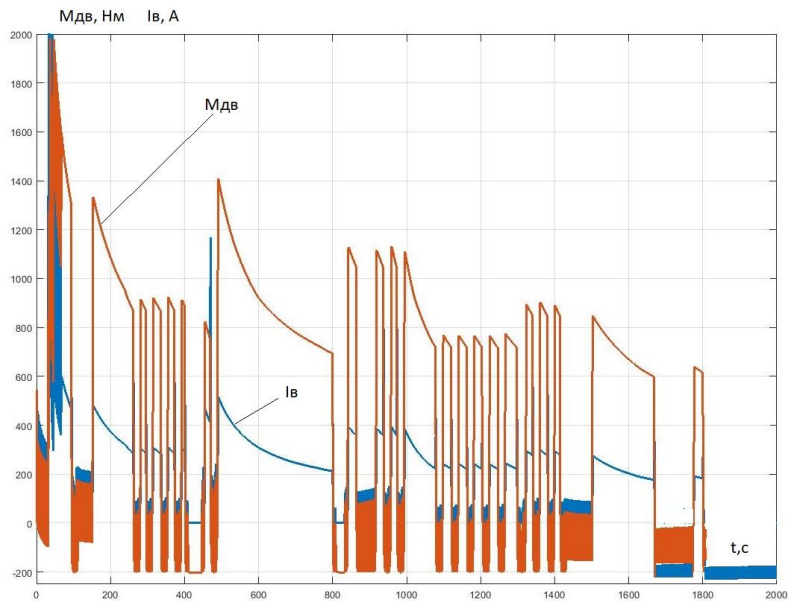


Рисунок 3 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Функціональна схема роботи модернізованого гібридного тепловоза

10

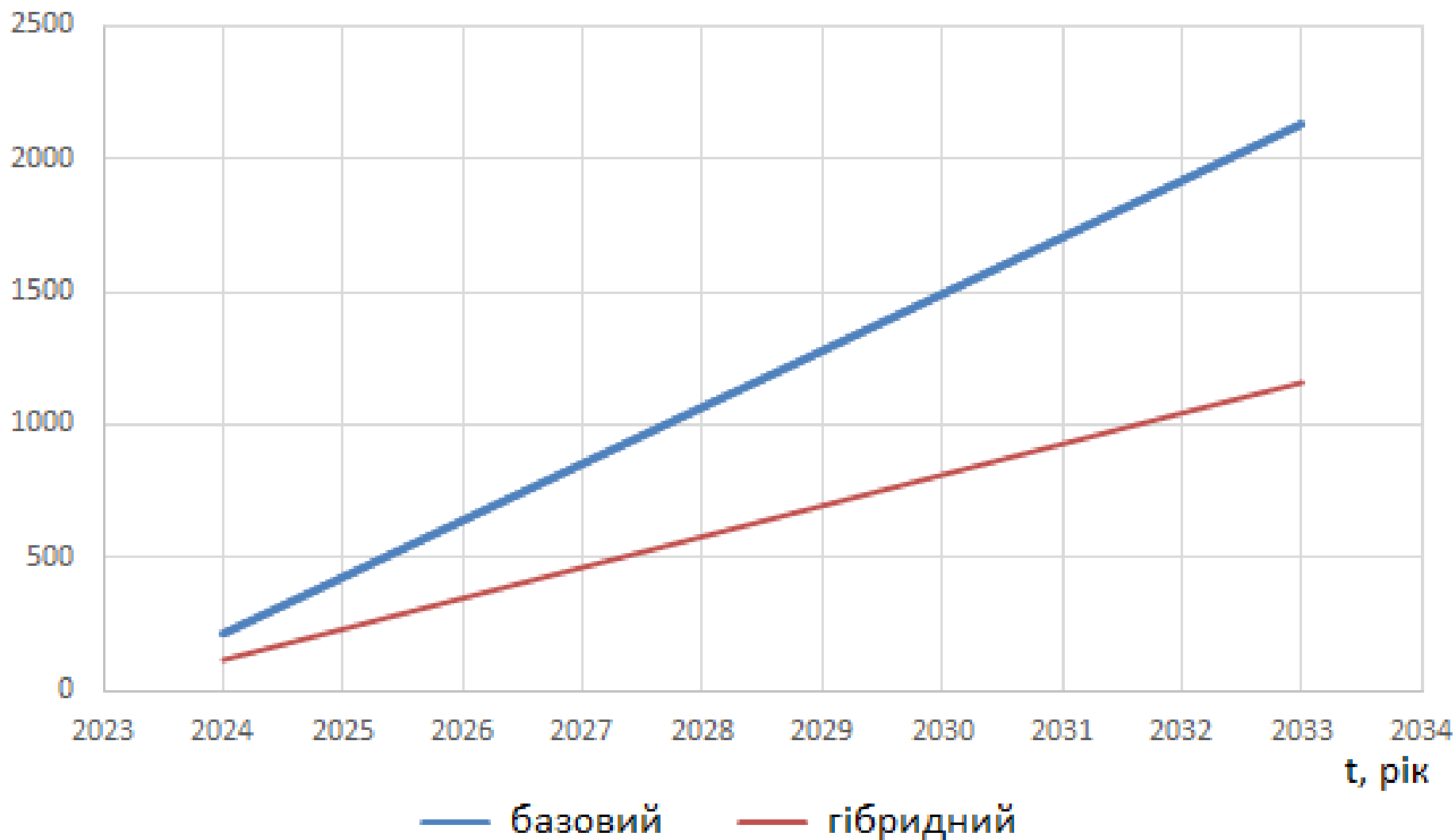




V_z – задана швидкість потяга; V – реальна швидкість потяга; i – профіль шляху; m – витрати палива; $I_{б}$ – струм акумуляторної батареї; $M_{дв}$ – момент тягового двигуна; U_b – напруга акумуляторної батареї

Витрати пального на роботу локомотива за роками 12

m, т



- У роботі було проведене дослідження тягової електричної передачі тепловоза ЧМЕЗ для аналізу можливості його подальшої модернізації;
- Запропонований варіант модернізації із встановленням гібридної силової установки на базі накопичувачів енергії;
- Розроблені імітаційні моделі роботи тепловозу ЧМЕЗ з базовою та гібридною системами та був проведений порівняльний аналіз їх роботи;
- Був розрахований економічний ефект від запропонованої модернізації тепловоза.